



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

LENTOTUHKKA—MOREENI-SEOS KAATOPAIKAN POHJARAKENTTEEN MATERIAALINA

TEKIJÄ: Joni Mutanen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Ympäristötekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä Joni Mutanen	
Työn nimi Lentotuhka—moreeni-seos kaatopaikan pohjarakenteen materiaalina	
Päiväys 1.6.2017	Sivumäärä/Liitteet 37/4
Ohjaaja(t) lehtori Teemu Räsänen, yliopettaja Merja Tolvanen	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Jätekukko Oy, Jani Bergström	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyö tehtiin Kuopion Jätekukolle, joka ohjaa ja jalostaa jätemateriaaleja uusiokäyttöön. Kaatopaikan pinta- ja pohjarakenteilla pyritään estämään suotovesien kulkeutumista ja imeytymistä ympäristöön ja maaperään. Vedenläpäisevyys on tärkeimpiä rakenteiden ominaisuuksia ja sille asetetut vaatimukset on ehdottomasti täytettävä. Tarkoituksena oli selvittää lentotuhka—moreeni-seoksen soveltuvuutta kaatopaikan pinta- tai pohjarakenteen materiaalina. Työn tavoitteena oli löytää seos jota voidaan käyttää kaatopaikan rakenteiden materiaalina. Lentotuhkan hyötykäyttöä täytyisi lisätä, koska sillä pystytään korvaamaan uusiutumattomia raaka-aineita ja vähentämään ympäristökuormitusta.</p> <p>Tuhka—moreeni-seoksen soveltuvuutta tutkittiin erilaisilla kokeilla, joita olivat rakeisuuskoe, Proctor-koe ja vedenläpäisevyyskoe. Kokeissa käytetyn lentotuhkan määrät seoksen massasta olivat 10 % ja 30 %. Kokeita tehtiin myös bentoniitti—moreeni-seoksille, joissa bentoniittia käytettiin 3 % ja 5 % sekä pelkälle moreenille. Käytetty lentotuhka tuli Kuopion Energialta, jossa polttoaineena käytetään turvetta ja puupolttoaineita.</p> <p>Lentotuhka—moreeni-seosten vedenläpäisevyydeksi saatiin $9,77 \cdot 10^{-7}$ m/s ja $3,30 \cdot 10^{-6}$ m/s, moreenille $3,97 \cdot 10^{-7}$ m/s ja bentoniitti—moreeni-seoksille $1,32 \cdot 10^{-9}$ m/s ja $8,81 \cdot 10^{-9}$ m/s. Asetettu vaatimus on $1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s, joten saatujen tulosten mukaan mikään seos ei kelpaisi materiaaliksi. Bentoniittiseoksille voisi tehdä lisätutkimuksia kuten myös lentotuhka—bentoniitti—moreeni-seoksille.</p>	
<p>Avainsanat</p> <p>Lentotuhka, bentoniitti, kaatopaikan tiivistysrakenteet, vedenläpäisevyys</p>	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Environmental Technology			
Author(s) Joni Mutanen			
Title of Thesis Suitability of Fly Ash-Moraine Mixture as Landfill Base Structure Material			
Date	1 June 2017	Pages/Appendices	37/4
Supervisor(s) Mr Teemu Räsänen, Senior Lecturer, Ms Merja Tolvanen, Principal Lecturer			
Client Organisation /Partners Jätekukko Oy, Mr Jani Bergström			
<p>Abstract</p> <p>Surface and base structures of landfills try to stop absorption and diversion of filtration water to the soil and environment. Water permeability is one of the most important qualities of structures and its requirements must be reached. The thesis was made for Jätekukko. The aim of this thesis was to find out the suitability of fly ash-moraine mixture as a landfill material. Fly ash is used in concrete and road constructions but its use should be increased because it can replace nonrenewable raw materials and decrease environmental load.</p> <p>The suitability of fly ash-moraine mixture was investigated by different tests. The tests were the granularity test of soil, the Proctor compaction test and the water permeability test. The amount of fly ash was 10 % and 30 % of the mass of fly ash-moraine mixture. The tests were also made to bare moraine and bentonite-moraine mixture where the amount of bentonite was 3 % and 5 %. The used ash was obtained from Kuopion Energia where peat and wood is used as a fuel.</p> <p>The results of the water permeability of the fly ash-moraine mixtures were $9.77 \cdot 10^{-7}$ m/s and $3.30 \cdot 10^{-6}$ m/s, with moraine it was $3.97 \cdot 10^{-7}$ m/s and bentonite-moraine mixtures it was $8.81 \cdot 10^{-9}$ m/s and $1.32 \cdot 10^{-9}$ m/s. The limit of water permeability is $1.0 \cdot 10^{-9}$ m/s so it looks like that those mixtures do not meet that requirement. Bentonite mixtures and fly ash-bentonite-moraine-mixtures should be further investigated.</p>			
<p>Keywords</p> <p>Fly ash, water permeability, bentonite, compression structures of landfill</p>			

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	6
2	KAATOPAIKAN RAKENNEKERROKSET	7
2.1	Pintarakenne	7
2.1.1	Pintakerros	7
2.1.2	Kaasunkeräyskerros	8
2.1.3	Tiivistyskerros	8
2.1.4	Kuivatuskerros	9
2.1.5	Esipeitekerros	9
2.2	Pohjarakenne	9
2.2.1	Mineraalinen tiivistyskerros	10
2.2.2	Suojakerros	10
2.2.3	Salaojakerros	10
2.2.4	Suodatinkerros	10
3	LENTOTUHKA—MOREENI-SEOS	12
3.1	Lentotuhka	12
3.2	Lentotuhkan käyttö kaatopaikan materiaalina	14
3.3	Lentotuhkan hyötykäyttö	15
3.4	Moreeni	15
4	KAATOPAIKAN YMPÄRISTÖLUVAN VAATIMUKSET RAKENTEISIIN	17
4.1	Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista	17
4.2	Kuopion Jätekukon ympäristölupa	17
5	KOKEET	18
5.1	Maaperänäytteenotto	18
5.2	Rakeisuus	18
5.2.1	Pesuseulonta	19
5.2.2	Kuivaseulonta	19
5.2.3	Areometri	19
5.3	Proctor-koe	19
5.4	Vedenläpäisevyys	20
6	KOKEIDEN SUORITTAMINEN	22
6.1	Kokeiden prosessikaavio	22

6.2	Näytteenotto	22
6.3	Rakeisuus.....	23
6.4	Proctor-koe	23
6.5	Vedenläpäisevyys.....	24
7	TULOKSET	25
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	30
9	YHTEENVETO.....	31
	LÄHTEET	32
	LIITE 1: VEDENLÄPÄISEVYYDESSÄ KÄYTETTÄVÄT GRADIENTIT	34
	LIITE 2: PROCTOR-KOKEET.....	35
	LIITE 3: VEDENLÄPÄISEVYYDEN MITTAUSTULOKSET.....	36

1 JOHDANTO

Kaatopaikan pinta- ja pohjarakenteiden avulla pyritään vähentämään tai kokonaan estämään suoto-vesien imeytymistä ja kulkeutumista maaperään ja ympäristöön. Pohja- ja pintarakenteet koostuvat useista eri kerroksista, joilla on eri tehtävät ja niille on asetettu erilaisia vaatimuksia. Yksi tärkeimmistä rakenteiden ominaisuuksista on sen vedenläpäisevyys. Kaatopaikkojen pinta- ja pohjarakenteille on asetettu vedenläpäisevyyden raja-arvot, jotka täytyy saavuttaa. Tutkimuksissa keskitytään lähinnä tiivistyskerroksiin, joihin lentotuhka—moreeni-seoksia tultaisiin käyttämään. Lentotuhkaa käytetään mm. tierakentamisessa ja betonissa, mutta sen hyötykäyttöä tulisi lisätä, koska sillä voidaan korvata uusiutumattomia raaka-aineita ja vähentää ympäristökuormitusta.

Työn tarkoitus on selvittää lentotuhka—moreeni-seoksen soveltuvuutta kaatopaikan pohjarakenteen materiaalina, lisäksi tutkitaan bentoniitti—moreeni-seoksia. Tavoitteena on löytää sellainen seos, joka täyttää kaatopaikkojen rakennekerroksille asetetut vaatimukset, silloin sitä olisi mahdollista käyttää joko pohja- tai pintamateriaalina tai molemmissa. Seosten soveltuvuutta tutkitaan vedenläpäisevyyssokeilla, johon kuuluvat myös Proctor- ja rakeisuuskokeet. Kokeet tehdään yhdessä Valtteri Kinnusen kanssa, joka keskittyy bentoniittiseoksiin. Aikaisemmillä tutkimuksilla lentotuhkan vedenläpäisevyydeksi on saatu $1 \cdot 10^{-6}$ – $1 \cdot 10^{-8}$ m/s. Toimeksiantaja on Kuopion Jätekuukko Oy, jonka kanssa tutkimuksia oli tehty jo aikaisemmin. Jätekeskuksessa sijaitsee tavanomaisen jätteen kaatopaikka, muita kaatopaikkoja ovat vaarallisen jätteen ja pysyvän jätteen kaatopaikat. Käytettävä moreeni ja lentotuhka saadaan Jätekuukolta, jonne tuhka on toimitettu Kuopion Energialta. Vedenläpäisevyys kokeet tehdään yhdessä Suomen GPS mittauksen henkilöstön kanssa kiviaineslaboratoriossa.

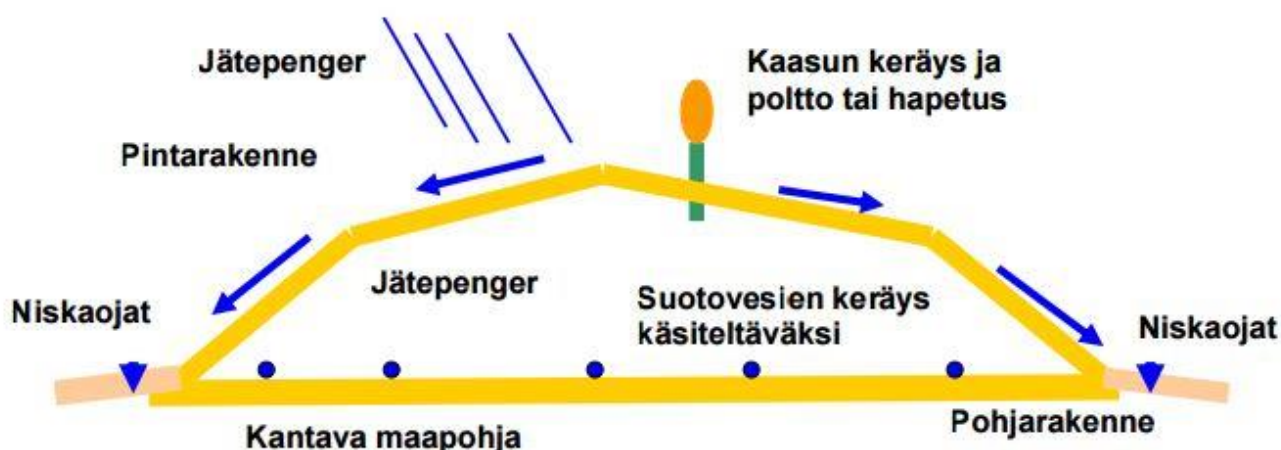
Lentotuhka on epäorgaanista ainetta, jonka muodostavat polttoprosessin palamattomat aineet. Lentotuhkan laatuun vaikuttavat mm. polttoaine, polttoprosessi ja tuhkanerotustekniikka. Kuopion Energian polttoaineena käytetään turvetta ja puupolttoaineita, josta muodostunutta tuhkaa käytetään tutkimuksissa. Tuhkan käyttöä voitaisiin lisätä, jos se soveltuisi kaatopaikan materiaaliksi. Saatuja tuloksia on mahdollista hyödyntää jatkotutkimuksissa.

Kuopion Jätekuukko Oy on kuntien omistama yhtiö ja se tuottaa palveluja kiinteistöjen jätehuoltoon sekä vastaanottaa jätteitä. Toimialueeseen kuuluu 16 kuntaa ja asukkaita on n. 220 000. Vuodessa vastaanotetaan jätettä 150 000 tonnia ja siitä hyödynnetään 90 %. Tehtäviin kuuluvat mm. jätemateriaalien jalostaminen tai ohjaaminen uusiokäyttöön, hyödynnettävien jätteiden vastaanotto, tuhkien vastaanotto ja käsittely sekä jätteiden esikäsittely ja käsittely. Jätekeskuksessa on tavanomaisen jätteen loppusijoitusalueen lisäksi monia muitakin vastaanotto- ja käsittelyalueita. Loppusijoitukseen menee mm. rakennusvillat asbestit ja PVC-muovit sekä muita hyödyntämiskelvottomia jätteitä. Alueella on myös suljettuja täyttöalueita ja pilaantuneiden maiden tuhkien ja kompostien käsittelykenttiä, lievästi likaantuneiden vesien tasaus-/käsittelyallas sekä biokaasulaitos. Loppusijoitettavan jätteen määrä on vähentynyt, mutta vastaanotettavien jätteiden määrä on kasvussa. (Ympäristölupa 2015, 1,8; Jätekuukko.fi.)

2 KAATOPAIKAN RAKENNEKERROKSET

2.1 Pintarakenne

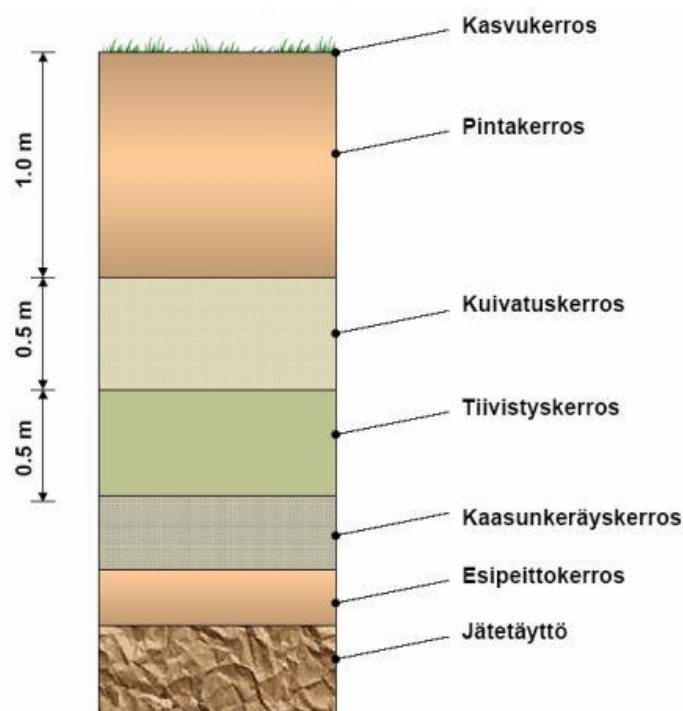
Lentotuhkaa voidaan käyttää kaatopaikkojen pinta- ja pohjarakenteissa, käyttö ei kuitenkaan ole ollut kovinkaan yleistä Suomessa. Kaatopaikan rakennekerros koostuu pintarakenteesta, jätetäytöstä ja pohjarakenteesta (Kuva 1). Pintarakenne koostuu kasvu-, pinta-, kuivatus-, tiivistys-, kaasunke-räys- ja esipeitekerroksista. Kaatopaikan pinta- ja pohjarakenteiden avulla pyritään vähentämään tai kokonaan estämään suotovesien imeytymistä ja kulkeutumista maaperään ja ympäristöön. Jätekes-kuksen alueella muodostuu puhdasta pintavettä, jätevettä ja loppusijoitusalueiden suotovettä. Suo-tovedet ja käsittelyalueiden jätevedet johdetaan tasausaltaaseen ja siitä edelleen jätevedenpuhdistamolle, vedet voidaan myös esikäsitellä ennen tasausaltaaseen johtamista, vuodessa jätevesiä muo-dostuu n. 110 000 m³. (Ympäristötekniikan perusteet 2008, 88; Pesonen 2012, 50; Jätekuukko.fi; Ympäristölupa 2015.)



Kuva 1. Kaatopaikan periaatteellinen rakenne (Suomen geoteknillinen Ry, s.73)

2.1.1 Pintakerros

Kaatopaikan jätteen täyttöalueen täytyessä sen päälle rakennetaan pintakerros, jonka tarkoitus on estää sadevesien ja pintavaluntavesien imeytyminen jätteeseen (Kuva 2). Pintakerroksella myös maisemoidaan aluetta ja se toimii kasvillisuuden kasvualustana. Pintakerroksen paksuus on 1 m ja se koostuu pintakerroksen alaosaan esim. maa-aineksesta ja kasvukerroksesta, jossa käytetään esim. humusmaata ja kompostia. Yleensä alaosan paksuus on 0,7 m ja kasvukerroksen 0,3 m. Li-säksi tiiviillä pintakerroksella voidaan tehostaa kaasujen keräystä ja vähentää haju- ja pölyhaittoja. Suunniteltaessa pintakerrosta huomioon on otettava veden ja tuulen aiheuttama eroosio, rou-tasyvyys, juurien tunkeutuminen maahan ja onnettomuustilanteet. Kerroksen toimivuuteen vaikutta-vat rakennekerrokset, kaltevuus, lumenauraus sekä kasvillisuus, lisäksi sen ominaisuuksien on kes-tettävä kaatopaikan pinnan painuessa. (Suomen ympäristökeskus 2002, 59; Pesonen 2012, 51.)



Kuva 2. Kaatopaikan pintarakenne (Suomen geoteknillinen Ry, s.90)

2.1.2 Kaasunkeräyskerros

Kaasunkeräyskerroksen tarkoitus on kerätä kaasut, jotka syntyvät jätetäytön orgaanisen aineen hajotessa hapettomissa olosuhteissa ja johtaa ne käsiteltäviksi. Kaasunkeräysjärjestelmään kuuluvat pystykaivot tai pystykivikäytävät tai- putkistot ja vaakasalaojat. Kaasunkeräyspumppaamo on kauko- käyttöjärjestelmällä toimiva laitos, jonka avulla imutehoja säädetään kaasun paineen ja pitoisuuksien mukaan. Keräysjärjestelmää seurataan useilla eri mittauksilla kuten kaasun koostumuksen, paineen ja lämpötilan mittauksilla. Kerätyt kaasut johdetaan Kuopion Energian Pitkälahden lämpölaitokselle. Kaasussa on metaania 55 %, hiilidioksidia 40 % ja muita yhdistelmiä. Materiaalina käytetään yleensä karkeaa ainesta kuten soraa tai hiekkaa ja sen täytyy olla hyvin kaasua läpäisevää eikä se saa reagoida suotovesien tai kaasujen kanssa niin, että se heikentäisi kaasunjohtavuutta. Ennen käyttöä sorasta ja hiekasta täytyy kuitenkin poistaa hienoaaines. Kerros myös lisää tiivistyskerroksen kantavuutta. Kerroksen suositeltava minimipaksuus on 0,3 m. Jättemassaa voidaan myös kastella kaasunmuodostumisen tehostamiseksi ja siihen voidaan käyttää vedensyöttöputkistoa kaasunkeräyskerroksessa tai sen alapuolella, kasteluun voidaan käyttää esimerkiksi suतोvesiä. (Suomen ympäristökeskus 2002, 61; Pesonen 2012, 51; Jätekuukko.fi; Ympäristölupa 2015.)

2.1.3 Tiivistyskerros

Tiivistyskerroksen tehtävänä on estää sadevesien pääsy jätteeseen ja lisäksi ohjata keräilyjärjestelmään kaatopaikkakaasut. Vettä saisi päästä jätetäyttöön mahdollisimman vähän, joten tiivistyskerroksen täytyy olla riittävän vettä läpäisemätön. Tiivistyskerroksen täytyy olla riittävän kestävä ja sii-

hen vaikuttavat jätetäytön kaltevuus, kuivuminen, routiminen sekä biologiset ja kemialliset muutokset. Kerroksen toimivuutta parantaa se, jos materiaalin sulaminen ja jäätyminen eivät muuta sen läpäisevyyttä. Tiivistyskerroksessa voidaan käyttää luonnon kivennäismateriaaleja tai geosyntettejä kuten bentoniittimattoja. Lisäksi voidaan käyttää Keinotekoisia eristeitä kuten muovikalvoja, joilla voidaan kokonaan estää sadeveden kulkeutuminen jätetäytössä ja tehostaa kaasujen keräystä. Kivennäismateriaalia tarvitaan yleensä paljon tiivistykseen ja siinä ongelmana on saada riittävästi tasalaatuista materiaalia. (Pesonen 2012, 51.)

2.1.4 Kuivatuskerros

Kuivatuskerroksen avulla pintarakenteen läpäisseet suotovedet johdetaan jätetäytön ulkopuolelle. Kerroksen materiaalina olevan aineen täytyy olla hyvin vettä läpäisevää eikä siinä saa olla hienoaainesta. Kerroksen ylä- ja alapuolella on oltava suodattimet/suodatinkankaat, koska pintakerros ei saa tukkia kuivatuskerrosta eikä kuivatuskerroksen materiaali saa painautua tiivistyskerrokseen. Jäätynyt kerros aiheuttaa sulatessaan stabiliteettiongelmia, joten kuivatuskerros ei saisi jäätymä. (Pesonen, 51 - 52.)

2.1.5 Esipeitekerros

Esipeitekerroksen tarkoitus on estää jätteen ja tiivistyskerroksen materiaalin sekoittuminen, edistää paineen jakautumista sekä johtaa muodostuvia kaasuja kaasunkeräyskerrokseen. Kerroksen materiaalina käytetään ylijäämämaata tai luonnonmaa-aineksia, paksuuden on oltava vähintään 0,3 m. Kerrosta tehtäessä jätetäytön pinta muotoillaan, niin että sen kaltevuus on vähintään 5 %, jotta pintavalunta saadaan riittävän suureksi. (Suomen ympäristökeskus 2012.)

2.2 Pohjarakenne

Pohjarakenteen tarkoitus on tehostaa puhdistettavaksi joutuvan suotoveden keräämistä ja lisäksi vähentää erilaisten haitta-aineiden joutumista ympäristöön (Kuva 3). Pohjarakenne koostuu suodatin-, salaoja-, suojakerroksista, mineraalisesta tiivistyskerroksesta, pohjamaasta ja mahdollisesta keinotekoisesta eristeestä. Pohjarakennetta tehtäessä on huomioitava maaperän rakenne sillä, jos se ei täytä vaatimuksia, niin silloin pohjarakenteeseen täytyy rakentaa tiivistyskerros, jolla siis estetään haitta-aineiden kulkeutumista ympäristöön. Rakennetun tiivistyskerroksen paksuus on oltava vähintään 0,5 m ja ongelmajätteen kaatopaikalla 1 m. Pohja- ja pintarakenteen kuivatuskerroksella on samat vaatimukset. Pohjarakenteen tulee olla kemiallisesti ja fysikaalisesti riittävän kestävä, sillä sen täytyy täyttää sille asetetut vaatimukset suunnitellun ajan, johon sisältyy myös jälkihoitoaika. (Suomen ympäristökeskus 2002, 51; Ympäristötekniikan perusteet 2008, 88; Pesonen 2012, 52.)

2.2.1 Mineraalinen tiivistyskerros

Mineraalisen tiivistyskerroksen tehtävä on vähentää haitta-aineiden suotautumista ja diffuusiota. Lisäksi se voi myös sitoa haitta-aineita kuten raskasmetalleja. Tiivistyskerroksen materiaalina käytetään yleensä kivennäismaa-aineita, joiden vedenläpäisevyyttä voidaan vähentää lisäaineilla kuten bentoniitilla. Keinotekoisilla eristeillä parannetaan haitta-aineiden pidättäytymistä ja tehostetaan suotovesien keräilyä. Pohjarakenteessa voidaan käyttää yhdistelmärakennetta eli se muodostuu mineraalisesta tiivistyskerroksesta ja keinotekoisesta eristeestä. Yhdistelmä rakenne on yksittäistä rakennetta tehokkaampi estämään haitta-aineiden kulkeutumista. (Suomen ympäristökeskus 2002, 54 - 55.)

2.2.2 Suojakerros

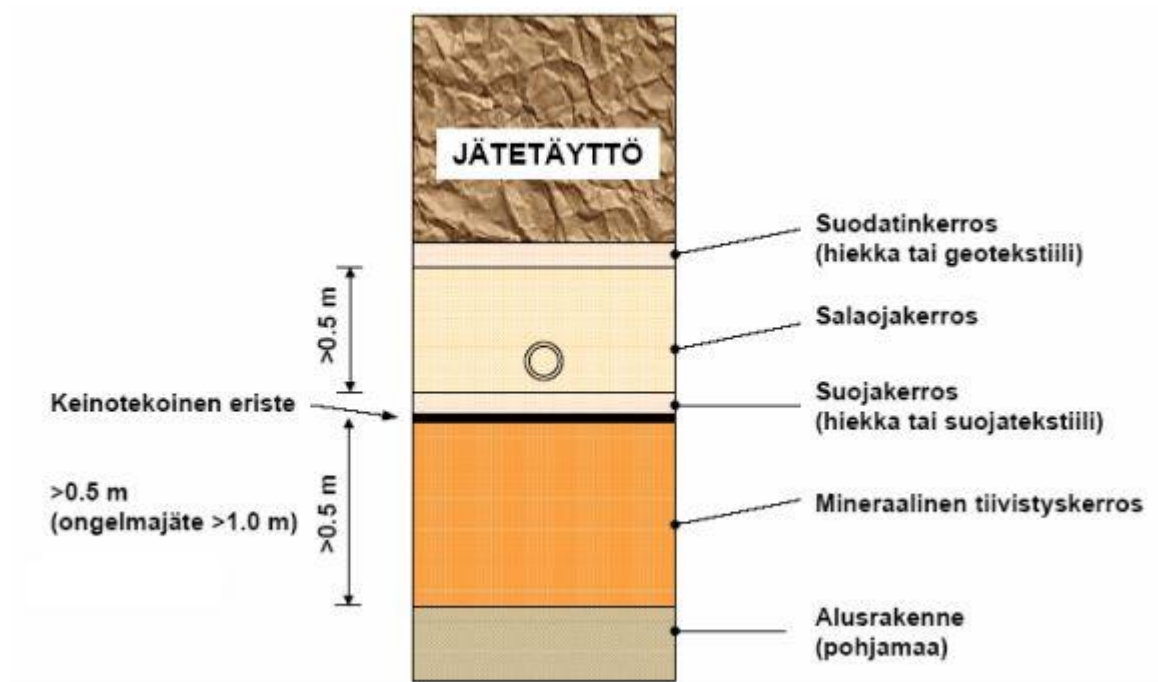
Suojakerros vastaanottaa ja jakaa yläpuolisista kerroksista aiheutuvia mekaanisia ja termisiä kuormituksia, jotta ne eivät aiheuta pysyviä muodonmuutoksia keinotekoiseen eristeeseen. Suojakerros voidaan valmistaa mineraaliaineksesta, neulasidotusta geotekstiilistä tai molemmista sekä hiekka- tai bentoniittimatoista. (Suomen ympäristökeskus 2002, 56 - 57.)

2.2.3 Salaojakerros

Salaojakerros kerää ja poistaa jätetäytöstä tulevia vesiä ja lisäksi se vähentää tiivistysrakenteeseen kohdistuvaa vesipainetta. Kerätyt suotovedet pumpataan pois ja johdetaan käsiteltäväksi. Salaojakerros tehdään salaojasorasta tai -murskeesta. Salaojakerros tukkeutuu biologisesti, kemiallisesti ja mekaanisesti. (Suomen ympäristökeskus 2002, 57.)

2.2.4 Suodatinkerros

Suodatinkerros erottaa jätetäytön salaojakerroksesta ja estää kiintoaineksen kulkeutumista salaojakerrokseen. Salaojakerroksen tukkeutumista voidaan vähentää oikeanlaisella suodatinkerroksella. Kerros voidaan tehdä maa-aineksesta tai suodatinkankaasta ja sen valintaan vaikuttaa materiaalien suodatinominaisuudet. (Suomen ympäristökeskus 2002, 58.)



Kuva 3. Kaatopaikan pohjarakenne ((Suomen geoteknillinen Ry, s.88)

3 LENTOTUHKA—MOREENI-SEOS

3.1 Lentotuhka

Lentotuhka on epäorgaanista ainetta, jota syntyy polttaessa esimerkiksi turvetta, kivihiiltä tai puupolttoaineita, tuhkan muodostavat polttoprosessin palamattomat aineet. Lentotuhka sisältää mm. kaliumia, kalsiumia, magnesiumia, rautaa, piitä ja alumiinia, joiden pitoisuudet riippuvat siitä mitä polttoainetta on käytetty. Lentotuhkan laatuun vaikuttavat polttoprosessi, polttoaine ja tuhkanerotustekniikka. Lentotuhka on hienojakoista ja rakeisuudeltaan se on samanlaista kuin siltti. Tutkittavana on Haapaniemi 2 -laitoksessa muodostuva lentotuhka, jota toimitetaan mm. Jätekukolle (Kuva 4). Lentotuhka erotetaan savukaasuista sähkösuodattimen avulla. Polttoaineena leijukerroskattilassa käytetään turvetta ja puupolttoaineita. (Seppälä 2017-03-07.)

Lentotuhkan lujittumisominaisuudet ja geotekniset indeksiominaisuudet vaikuttavat sen käyttäytymiseen rakenteissa (Taulukko 1). Taulukkoa voidaan käyttää lähinnä viitteellisenä tietona, sillä tuhkan laatuun vaikuttavat niin monet eri tekijät. Ennen tuhkan käyttöä on tarpeen tehdä riittävät tutkimukset ominaisuuksien selvittämiseksi. (Tuhkarakentamisen käsikirja 2012,12.)

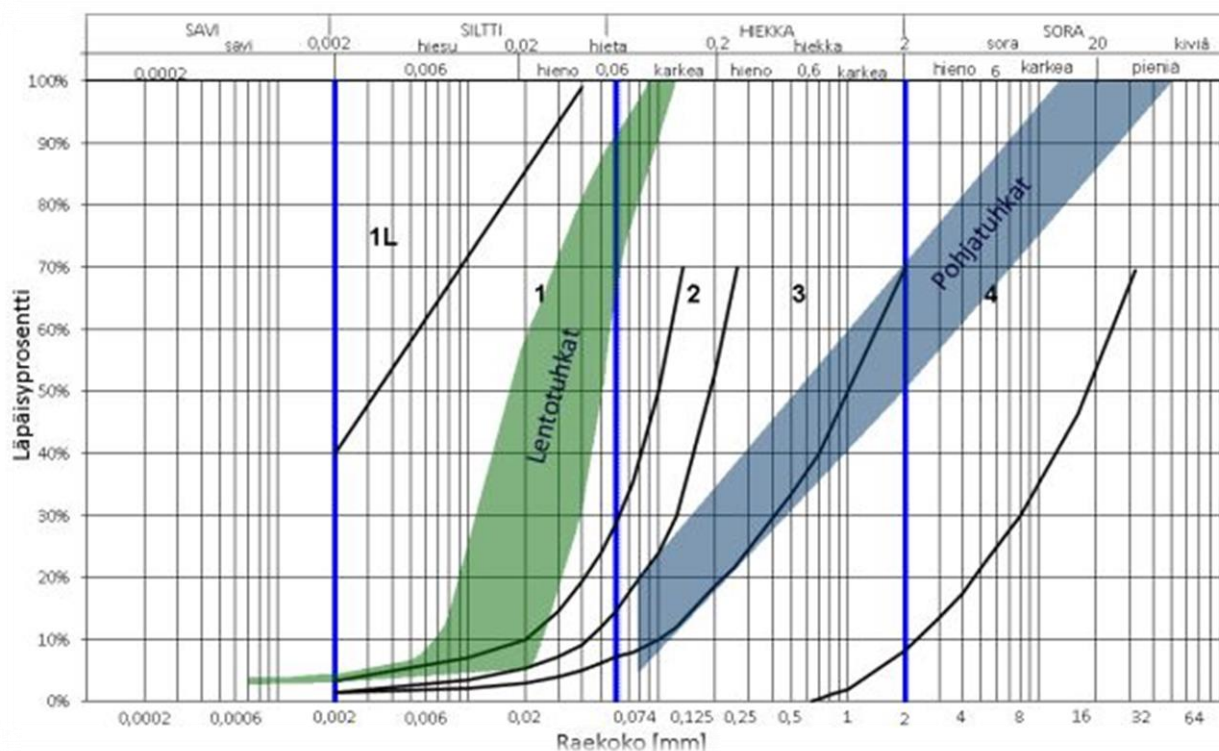


Kuva 4. Lentotuhka (Kinnunen, 2017)

Taulukko 1. Tuhkien geotekniset indeksiominaisuuksien ominaisarvoja (Muokattu lähteistä Rambollin aineistot, Rudus 2008 ja Fingery 2000)

Ominaisuus	Olosuhde	Lentotuhka	Pohjatuhka
Rakeisuus [mm]		0,002–0,1 (siltti)	0,002–16 (hiekk)
Optimivesipitoisuus [%]		20–50	16–24
Maksimikuivairtoteiheyys [kg/m ³]		1100–1400	1000–1500
Märkäirtoteiheyys tiivistettynä [kg/m ³]		1300–1500	1250–1800
Kitkakulma [°]	lujittumaton	28–36	39–53
	lujittunut	49–77	
Koheesio [kPa]	lujittumaton	23–47	10–30
	lujittunut	64–490	
Vedenläpäisevyys [m/s]	lujittumaton	10 ⁻⁷ –10 ⁻⁶	10 ⁻⁶ –10 ⁻⁵
	lujittunut	10 ⁻⁸ –10 ⁻⁶	
Hehkutushäviö [%]		1–15	-
Lämmönjohtavuus [W/mK]	sula	0,4–0,6	0,9
	jäätynyt	0,8	
Segregaatiopotentiaali [mm ² /Kh]		0,05–5	<0,2

Lentotuhkan rakeisuus vaihtelee siltin ja hiekkaisen siltin välillä. Raekoko d_{50} on 0,02 - 0,05 mm ja hienoaineksen osuus on 65 - 90 %. Tuhkan ikä ja kasavarastointi voi tehdä tuhkaista hieman karkeampaa. Kuvan 5 alueen 1 maa-aines on routivaa, hyvin lujittuvat lentotuhkat ovat kuitenkin yleensä routimattomia. Alueet 2 - 4 ovat routimattomia, mikäli käyrät eivät leikkaa vasemmanpuoleista rajakäyrää. (Tuhkarakentamisen käsikirja 2012, 13.)



Kuva 5. Lento- ja pohjatuhkan rakeisuuskäyrät

Lentotuhkan optimivesipitoisuus on noin 20 - 50 %, mutta pitoisuuteen vaikuttaa merkittävästi tuhkan ikä ja polttoprosessissa käytetty polttoaine, joten sen selvittäminen on suositeltavaa ennen rakentamista. Yleensä tuoreiden tuhkien optimivesipitoisuus on pienempi kuin vanhojen kasavarastoitujen tuhkien. Myös raskaammilla ja karkeimmilla tuhkillä optimivesipitoisuus on pienempi kuin kevyillä ja hienorakeisilla tuhkillä. Lentotuhkan lämmönjohtavuus on noin 0,4 - 0,6 W/km, joka on pienempi kuin soralla ja hiekalla. Lentotuhkien vedenläpäisevyys tiivistettynä on noin $1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-7}$ m/s. Lentotuhkan routivuuteen vaikuttaa sen kyky lujittua ja kestää jäätymis-sulamissyklejä. Routimaton lentotuhka on hyvin lujittuvaa ja se kestää hyvin jäätymistä ja sulamista, kun puolestaan heikosti lujittuvat ja huonosti jäätymis-sulamissyklejä kestävät tuhkat ovat yleensä lievästi routivia tai routivia. Pitkäaikaiskestävyys edellyttää routimatonta ja hyvin jäätymistä ja sulamista kestävää tuhkarakennetta. Routiminen heikentää tuhkan ominaisuuksia. (Tuhkarakentamisen käsikirja 2012, 12 – 15.)

Lentotuhkan lujittumisominaisuuksilla on merkittävä vaikutus geoteknisiin indeksiominaisuuksiin ja tuhkarakenteen laatuun. Lujittumisominaisuuksilla kuvataan sitä kuinka materiaali lujittuu sitä kosuttaessa ja tiivistettäessä. (Tuhkarakentamisen käsikirja 2012, 16.)

3.2 Lentotuhkan käyttö kaatopaikan materiaalina

Tuhka luokitellaan ensisijaisesti jätteeksi ja sen käyttöä säätelee jätelaki (646/2011) ja ympäristönsuojelulaki (86/2000 ja 647/2011), joten tuhkan käyttö maarakentamisessa vaatii ilmoittamismenettelyn (MARA-asetus) tai ympäristöluvan. Tuhkien ympäristökelpoisuus voidaan osoittaa esimerkiksi

sen haitta-aineiden pitoisuuksilla ja liukoisuuksilla. Tuhkan haitta-aineiden liukoisuuksiin voi vaikuttaa mm. lentotuhkan ikä, joka vaikuttaa mineralisoitumiseen, stabiloiminen tai seostaminen, jolloin ominaisuuksia jalostetaan side- tai seosaineilla tai tuhkan tiivistyminen.

Lentotuhkaa voidaan hyödyntää kaatopaikan materiaalina pinta-, kasvu- ja tiivistyskerroksissa. Tuhkan käyttöä voi rajoittaa sen sisältämät haitta-aineet kuten raskasmetallit esim. kromi, arseeni ja seleeni. Pintarakenteiden on kestettävä muodonmuutoksia ja kun tuhasta tehty tiivistyskerros kovettuu se voi aiheuttaa hankaluuksia sen käytössä. Lentotuhkaa ei voida hyödyntää pintarakenteiden tiivistyskerroksissa jos siinä tulee olemaan epätasaista painumista. Tiivistetyn tuhkan vedenläpäisevyys on n. $1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-7}$ m/s ja se pienenee kovettumisen vaikutuksesta, lisäksi läpäisevyyttä voidaan pienentää bentoniitilla. (Soininen, Mäkelä, Kyyhkynen ja Muukkonen 2010, 41.)

3.3 Lentotuhkan hyötykäyttö

Lentotuhkaa käytetään betonin valmistuksessa täyte- ja sideaineena, asfaltin sideaineena, tierakenteiden jakavissa kerroksissa, suodatin kerroksissa sekä alemmissa kerroksissa. Lentotuhkan hyötykäyttöä voivat rajoittaa tuhkan sisältämät raskasmetallit, joista merkittävimpiä ovat molybdeeni, seleeni, arseeni ja kromi. Tutkimusten perusteella metallien liukoisuus täytyy huomioida tuhkan käytössä, niiden mukaan muiden metallien liukoisuudella ei ole merkitystä. Tuhkaa syntyy Kuopion Energian Haapavoimanlaitokselta jopa 20 000 tonnia vuodessa, Suomessa syntyvän tuhkan määrä on puolestaan n.1,5 miljoonaa tonnia vuodessa. (Saarelma 2011, 13.)

Lentotuhkan hyötykäytöllä voidaan vähentää ympäristökuormitusta, sillä päästöjen, kuljetuksien ja jätteiden määrät vähenevät. Uusiutumattomia sora- ja kiviainesvaroja voidaan säästää käyttämällä niiden tilalla tuhkaa, myös kaatopaikalle loppusijoitettavan tuhkan määrä vähenee. (Ashpower.)

3.4 Moreeni

Moreeni on Suomen yleisin pintamaalaji ja sitä esiintyy kalliopinnan päällä sekä tiiviinä pohjamoreenikerroksena. Suomen pinta-alasta melkein 60 % on pinnalta moreenipeitteistä ja lisäksi moreenia on myös muiden maalajikerrostumien alla muillakin alueilla. Pohjamoreenia esiintyy lähes 50 %:n alueella Suomen maa-alasta, sitä esiintyy myös soiden ja savikoiden alla. Moreeni on sekalajitteista kivimurskaa ja se sisältää kaikkia raekokoja savesta lohkaraisiin. Se on syntynyt kiviaineksesta, jonka jäätikkö on murskannut ja hionnut irronneesta kallioperästä. (GTK; Ronkainen 2012, 8.)

Moreenimaalajit ovat lajittumattomia ja se sisältää useita eri lajitteita. Maalaji on moreenia jos se sisältää 5 % sekä soraa että hienoaainesta. Maalaji nimetään rakeisuuskäyrän avulla, lisäksi sitä käytetään lisänimen antamiseen, jolla maalajia voidaan kuvata paremmin. Lisänimi annetaan jos maalajin nimeämiseen käytetyn lajitteen lisäksi toista lajitetta on yli 30 %, jos niitä lajitteita on useampia,

niin niistä valitaan hienojakoisempi. Maalajin lisänimiä ovat sorainen, hiekkainen ja silttinen. Moreenin vedenjohtavuus on yleensä huono ja se on routivaa sen sisältämän hienoaineksen takia. (Ronkainen 2012, 9 – 11.)

4 KAATOPAIKAN YMPÄRISTÖLUVAN VAATIMUKSET RAKENTEISIIN

4.1 Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista

Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista asettaa tiiveysvaatimuksia kaatopaikan pohja- ja pintarakenteisiin. Pohjarakenteen täytyy olla riittävän tiivis ja sitä voidaan parantaa rakennetulla tiivistymiskerroksella. Kaatopaikan pohjarakenteiden on täytettävä sille asetetut vaatimukset. (Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 331/2013, 6§, liite 1.):

- 1) vaarallisen jätteen kaatopaikka: $K \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s ja paksuus ≥ 5 m;
- 2) tavanomaisen jätteen kaatopaikka: $K \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s ja paksuus ≥ 1 m;
- 3) pysyvän jätteen kaatopaikka: $K \leq 1,0 \times 10^{-7}$ m/s ja paksuus ≥ 1 m.

Jätteen täyttöalueen päälle on vaarallisen jätteen ja tavanomaisen jätteen kaatopaikalle rakennettava vaatimukset täyttävät pintarakenteet (Taulukko 2; Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 331/2013, § 7, liite 1).

Taulukko 2. Pintarakenteen vaatimukset

Kerros	Tavanomaisen jätteenkaatopaikka	Vaarallisen jätteenkaatopaikka
Pintakerros ≥ 1 m	Vaaditaan	Vaaditaan
Kuivatuskerros $\geq 0,5$ m	Vaaditaan	Vaaditaan
Tiivistyskerros $\geq 0,5$ m	Vaaditaan	Vaaditaan
Keinotekoinen eriste	Ei vaadita	Vaaditaan
Kaasunkeräyskerros	Vaaditaan	Tarpeen mukaan

4.2 Kuopion Jätekukon ympäristölupa

Kuopion Jätekeskuksen ympäristölupaan oli haettu muutoksia ja uusi lupa tuli voimaan vuonna 2015. Lupamääräyksissä on asetettu vaatimuksia pohjarakenteen vedenläpäisevyydelle. Täyttöalueen pohja koostuu vähintään 0,5 metrin paksuisesta tiivistyskerroksesta, keinotekoisesta eristeestä ja vähintään 0,5 metrin paksuisesta kuivatuskerroksesta. Rakenteen on vastattava sellaisen maaperän tiiveyttä, jonka paksuus on vähintään 1 m ja sen vedenläpäisevyyskerroin K on oltava pienempi kuin $1,0 \times 10^{-9}$ m/s. Käyttäessä yhdistelmä rakenteita jokaisen rakennekerroksen on täytettävä vaadittu vedenläpäisevyyskerroin $1,0 \times 10^{-9}$ m/s. (Ympäristölupa 2015, 69.)

5 KOKEET

5.1 Maaperänäytteenotto

Maaperänäytteenoton tavoitteena on saada kohteesta näytteitä, jotka edustavat mahdollisimman hyvin tutkittavaa asiaa. Näytteenottosuunnitelma helpottaa näytteenottoa, vähentää virheitä ja mahdollistaa laadukkaammat näytteet. Näytteenottosuunnitelma sisältää mm. näytteenoton tarkoituksen, menetelmän, joita ovat koekuoppa-, kairaus- sekä lapionäytteenotto, näytteenottosyvyydet, näytteiden lukumäärän sekä tarvittavan määrän, työsuojeluasiat, aikataulun ja yhteystiedot. Näytteenottostrategia, näytteenottotekniikka, näytteenotto, näytteiden käsittely sekä kuljetus ja kohteen ominaisuudet vaikuttavat näytteenoton epävarmuuteen. Kokoomänäytteenotolla tarkoitetaan sitä, kun osanäytteitä otetaan useasta eri kohdasta, jonka jälkeen ne yhdistetään, näin saadaan parempaa tietoa tutkittavan kohteen ominaisuuksista. Kokoomänäytteenotossa on muistettava, että osanäytteiden tilavuudet tulisi olla yhtä suuret, osanäytteet täytyisi homogenisoida ennen niiden yhdistämistä ja osanäytteet täytyisi ottaa samasta maakerroksesta tai syvyydestä. (Suomen geoteknillinen yhdistys 2003, 26; Lepistö, Westerholm, Schultz, Uljas, Björklöf 2014, 12, 14, 18, 46.)

Maanäytteet ovat häiriintyneitä tai häiriintymättömiä. Häiriintynyt näyte on kyseessä silloin, kun maa-aineksen rakenne on rikkoutunut, mutta ainesosat pysyvät samassa suhteessa. Häiriintyneestä näytteestä voidaan selvittää rakeisuus ja humuspitoisuus. Häiriintymätön näyte on luonnontilaista maata ja maa-aineksen rakenne on ehjä. Kun maa-aines siirretään maasta laboratorioon, niin maan jännitystila muuttuu alkuperäisestä. Tämän takia laboratoriokokeissa voi olla pieniä virheitä, kun sitä verrataan luonnontilaiseen maahan. (Ronkainen 2012, 17.)

Moreenin tunnistaminen ei aina ole helppoa kenttäolosuhteissa ja yleensä siihen saadaan varmistus maalaboratorio kokeissa. Laboratoriossa voidaan tutkia maa-aineksen geologisia, fysikaalisia, kemiallisia ja teknisiä ominaisuuksia kuten raekokoa, vesipitoisuutta ja orgaanisen aineksen määrää. (Lepistö ym. 2014, 12.)

5.2 Rakeisuus

Rakeisuudella tarkoitetaan maanäytteen rakeiden suhteellista painojakaumaa, seulomalla voidaan selvittää suurempien kuin 0,074 mm rakeiden jakauma ja siitä pienempien areometrin avulla. Kivi- ja lohkare jakauman selvittämiseen käytetään muita menetelmiä. Rakeisuuden avulla maanäyte voidaan nimetä ja saada selville mikä maalaji on kyseessä, joten rakeisuuskoe on maalajin tärkein nimeämisperuste. Rakeisuutta voidaan hyödyntää mm. arvioitaessa maan vedenläpäisevyyttä, tiivistettävyyttä ja routivuutta sekä maan soveltuvuutta maarakenteisiin ja stabilointiin. Karkearakeisilla maalajeilla kuivaseulonta yleensä riittää rakeisuuden selvittämiseen. Näyte täytyy homogenisoida

ennen kokeen tekemistä, jos näyte on kuljetuksen tai käsittelyn aikana lajittunut, se voidaan tehdä sekoittamalla tai näytteenjakajan avulla. Rakeisuuden määrittämistä varten näytemäärä on hiekoilla 0,2 - 1 kg, sorilla 1 - 3 kg ja vielä karkearakeisimmilla näytteillä 4 - 15 kg. (Savonian työohje: rakeisuus.)

5.2.1 Pesuseulonta

Pesuseulonta tehdään silloin kun näyte sisältää karkeiden lajitteiden lisäksi myös hienoainesta, kuten moreenissa, koska kuivaseulonnalla ei tällöin saada oikeaa rakeisuuskäyrää. Pesulla näytteestä erotetaan hienoaines. Tarvittavan näytteen määrä on noin 0,5 - 2 kg ja sitä pestään vedellä 0,074 mm seulalla. Pesua jatketaan kunnes seulan läpi kulkeva vesi on kirkasta. Lopuksi näyte kuivataan ja sille tehdään kuivaseulonta. (Savonian työohje: rakeisuus.)

5.2.2 Kuivaseulonta

Kuivaseulonnassa näyte kuivataan 105 C:n lämpötilassa vähintään 4 - 5 tuntia, mutta hienorakeisilla näytteillä yön yli. Kuivattamisen jälkeen mahdolliset paakkuuntuneet osat hienonnetaan rikkomatta kuitenkaan yksittäisiä rakeita. Nyt näyte voidaan kaataa seulasarjalle ja käyttää tärytintä vähintään 10 minuuttia. Tämän jälkeen seuloille jääneet näytemäärät punnitaan. Areometrikoe voi olla tarpeen tehdä hienoaineksen raekoon määrittämiseksi jos näyte on sisältänyt yli 10 % alle 0,074 mm:n rakeita. Kokeeseen tarvitaan 100 g näytettä, joka on läpäissyt 2 mm seulan. (Savonian työohje: rakeisuus.)

5.2.3 Areometri

Areometri kokeella selvitetään maanäytteen 0,074 mm pienempien rakeiden jakauma. Koe ei kuitenkaan sovellu alla 0,001 mm rakeille. Humuspitoisista näytteistä humus poistetaan ennen koetta esim. vetyperoksidilla. Pelkkä areometrikoe riittää rakeisuuden määrittämiseen savi- ja silkinäytteillä. Koe voidaan tehdä kuivasta, ilmakuvasta tai luonnonkosteasta näytteestä. Kaikista täytyy kuitenkin määrittää vesipitoisuus. Savi- ja silttirakeita sisältävälle näytteelle ei suositella uunikuivatusta, koska savikollodit saattavat muuttua ja hiukkasten erottuminen toisistaan vaikeutuu sekä jää epätäydelliseksi. (Savonian työohje: rakeisuus.)

5.3 Proctor-koe

Proctor-kokeen avulla voidaan selvittää maa-aineksen maksimikuivatilavuuspaino ja sen optimivesipitoisuus ja sen lisäksi selvittää niiden välinen riippuvuus (Kuva 6). Kuivatilavuuspaino kuvaa maanäytteen kuivapainon suhdetta näytteen alkuperäiseen tilavuuteen. Kuivatilavuuspaino määritetään selvittämällä näytteen tiheys ja vesipitoisuus. Optimivesipitoisuus on se vesipitoisuus, jolloin

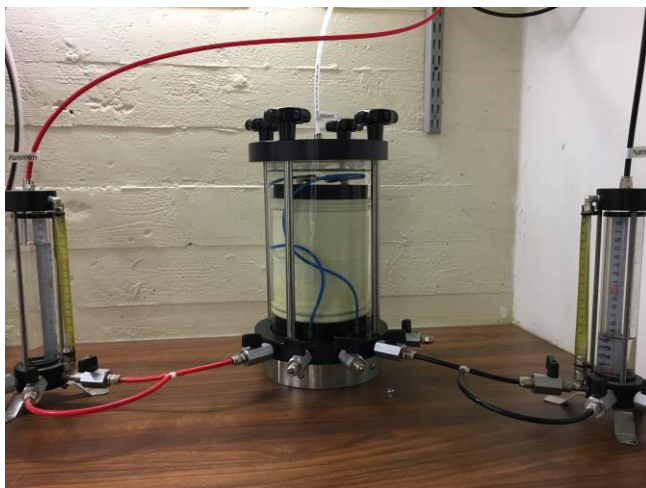
maalla on suurin kuivatilavuuspaino. Maksimikuivatilavuuspaino on riippuvainen tiivistysmenetelmästä ja tiivistämistyön määrästä. Yleisin menetelmä on parannettu Proctor-koe. Maalajin tiiveys vaikuttaa maan vedenläpäisevyyteen sekä lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksiin. Kokeesta saatuja tuloksia voidaan hyödyntää tiivistämistyö suunnittelussa, tiivistystarkkailussa sekä vedenläpäisevyyssmittauksissa. (Savonian työohje: Proctor-koe.)



Kuva 6. Proctor-laite ja käsin käytettävä Proctor-vasara (Kinnunen, 2017)

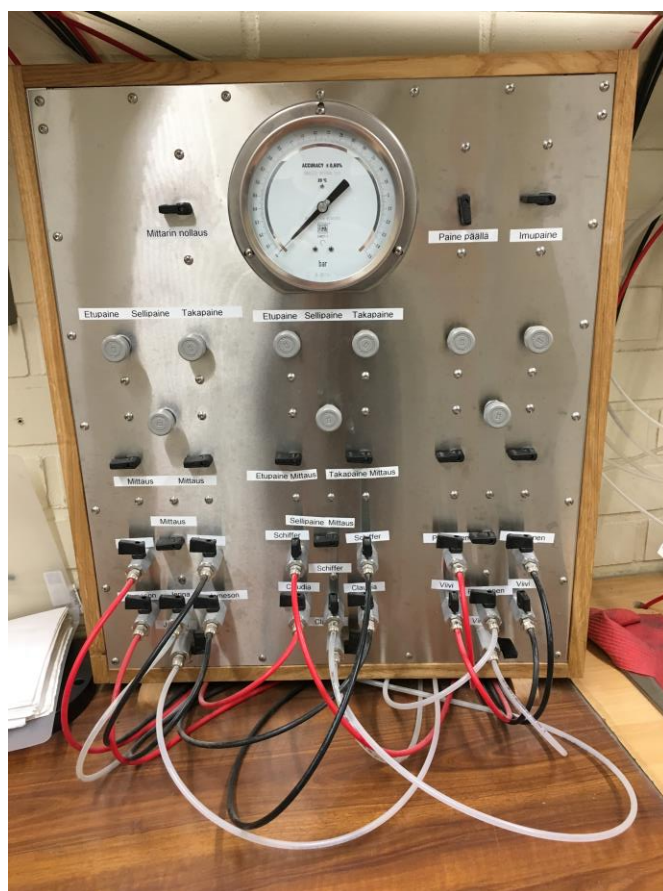
5.4 Vedenläpäisevyys

Vedenläpäisevyys eli hydraulinen johtavuus (m/s) tarkoittaa tietyn pinta-alan läpi virtaavan veden määrää aikayksikössä. Kaikki maalajit ovat vettä läpäiseviä ja vedenläpäisevyyteen vaikuttaa maalajin ominaisuudet kuten tiiveys, tekstuuri, vesipitoisuus, huokoisuus ja struktuuri. Materiaalin vedenjohtavuutta tarvitaan rakennusteknisissä, hydrologisissa ja muissa tieteellisissä tutkimuksissa (Kuva 7).



Kuva 7. Näyteselli, etupaineselli ja takapaineselli (Kinnunen, 2017)

Kokeissa käytetty Concell – mittauslaitteisto on ASTM 5084-90 (American Society for Testing and Materials) ja DIN 18130 (Deutsches Institut für Normung) –standardien mukainen. Laitteistoa käytetään huonosti vettä johtavien maalajien kuten hiekan, vedenjohtavuus $< 1 \cdot 10^{-6}$ m/s, mittaamiseen. Sitä voidaan myös käyttää hyvin vettä läpäisevien maalajien kuten hienon hiekan mittaamiseen. Mittauksissa käytettävä laitteisto on joustavaseinäinen, jossa näyte ympäröidään membraanikumilla, joka tiivistyy vedenpaineen vaikutuksesta näytekakun pintaan ja estää veden virtaamisen näytteen ja kumin välissä, tämä parantaa mittaustarkkuutta. Ennen vedenläpäisevyyden mittausta näyte täyttyy kyllästää, kyllästysvaihe kestää muutamasta tunnista useisiin viikkoihin. Huokosten tukkeutumista voidaan vähentää ja mittaustarkkuutta parantaa käyttämällä ilmatonta vettä kyllästyksessä ja mittaauksissa. Näytteeseen jäänyt ilma liuotetaan veteen tarpeeksi suurella sellipaineella ja käyttämällä taka- ja etupainetta. Kun etupaine on suurempi kuin takapaine, saadaan näytteen sisälle paine-ero eli hydraulinen gradientti, jolloin näytteessä vesi virtaa alhaalta ylöspäin. Mittausvaiheessa mitataan näytteen läpi liikkuvan veden tilavuusvirta usealla eri gradientilla ja lisäksi mitataan lämpötila. Vedenjohtavuus lasketaan hyödyntämällä Darcyn lakia ja korjataan vastaamaan 20 °C lämpötilaa. Mittauksissa käytetty laite koostuu paineensäätöyksiköstä, näytesellistä, vedentäyttösellistä sekä etu- ja takapainesellistä (Kuva 8). (Geo-Petech Oy 2002, 1.)

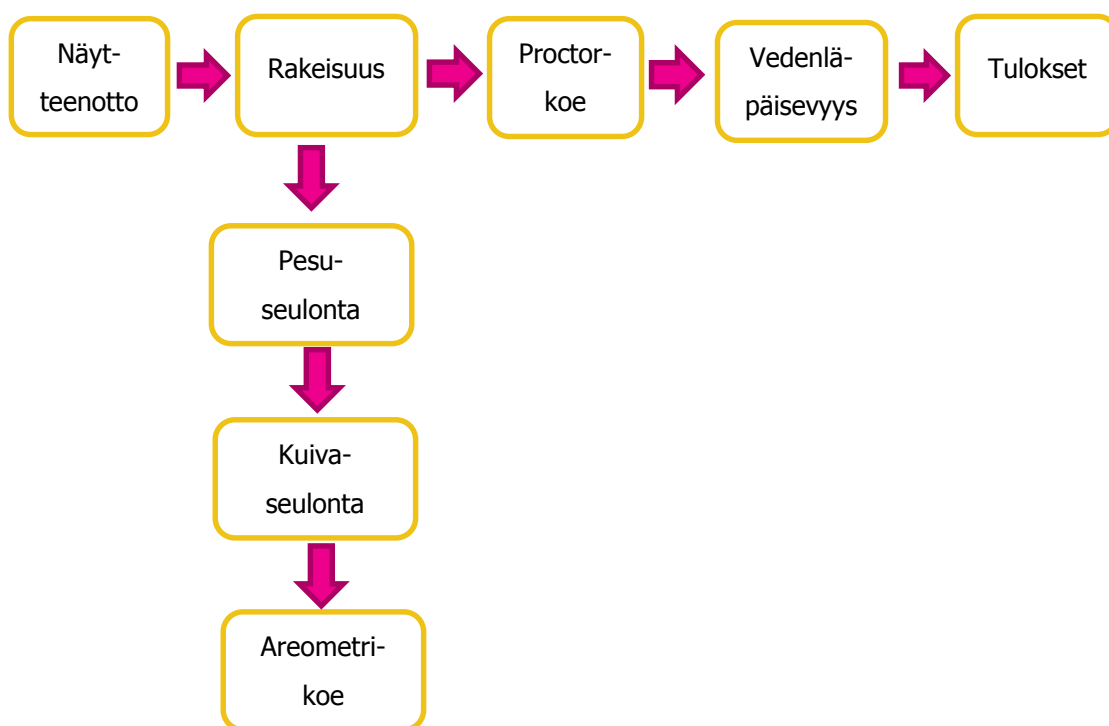


Kuva 8. Paineensäätöyksikkö (Kinnunen, 2017)

6 KOKEIDEN SUORITTAMINEN

6.1 Kokeiden prosessikaavio

Kokeiden tarkoituksena oli tutkia lentotuhka—moreeni-seosten soveltuvuutta kaatopaikan pohjamateriaalina ja sitä tutkittiin erilaisilla kokeilla (kuvio 1). Kokeet aloitettiin tammikuussa näytteenotolla, maa-aines ja lentotuhka haettiin Jätekukolta. Seuraavaksi moreeni kuivatettiin ja sille tehtiin rakeisuuskoe, johon kuuluivat pesuseulonta, kuivaseulonta ja areometrikoe. Rakeisuuskokeen avulla saatiin selville maa-aineksen maalaji ja sen rakeisuuskäyrä. Näiden kokeiden jälkeen tehtiin Proctor-koe, jolla saatiin selville seosten maksimikuivatilavuuspainot ja optimivesipitoisuudet. Proctor-koe täytyi tehdä ennen vedenläpäisevyyskoetta, sillä siitä saatuja tuloksia tarvittiin oikeiden näytteiden tekemiseen. Tämän jälkeen tehtiin vedenläpäisevyyskoe, jossa seurattiin sellien vedenpinnan muutosta eri gradienteilla. Viimeisenä mittaustuloksista laskettiin varsinaiset tulokset, jolla seosten vedenläpäisevyydet saatiin selville.



Kuvio 1. Kokeiden prosessikaavio

6.2 Näytteenotto

Suoritettavat kokeet aloitettiin näytteenotolla Jätekukolla sijaitsevasta moreenista, näytteet haettiin 16.1.2017 ja 24.2.2017. Näytteenotto suoritettiin lapiolla routapinnan alapuolelta kaivinkoneen avulla. Näytteet otettiin näin ollen vain yhdestä kohdasta eikä kokoomanäytteitä pystytty ottamaan. kokoomanäytteillä saataisiin parempaa tietoa moreenin koostumuksesta laajemmalla alueella kun nyt koostumus selviää vain yhdestä pienestä kohdasta. Näytteenotto kertoja oli kaksi ja yhdellä kertaa näytettä otettiin noin 40 kg. Näytteet kuljetettiin ja säilytettiin suljetuissa astioissa. Näytteet oli-

vat häiriintyneitä, sillä aineksen rakenne oli särkynyt, mutta se ei vaikuttanut rakeisuuskokeen tekemiseen. Tuhkat otettiin lapiolla tuhkakasasta, jotka sijaitsevat ulkoilmassa Jätekukolla. Tuhkaa otettiin samalla kerralla kuin moreenia ja yhdellä kertaa tuhkaa otettiin n.10 kg. Myös tuhkat kuljetettiin ja säilytettiin suljetuissa astioissa. Molemmat näytteet säilytettiin huoneenlämmössä.

6.3 Rakeisuus

Koe aloitettiin kuivaamalla hiekkamoreeni uunissa, jonka jälkeen se seulottiin 64, 32 ja 16 mm seulojen läpi. Jokaiselle seulalle jäänyt aines punnittiin. Pesuseulonta tehtiin 16 mm seulan läpäisseele materiaalille. Seulonnassa ainesta pestiin vedellä, jolloin hienoaines saatiin erotettua karkeammasta aineksesta, pesun jälkeen aines kuivattiin. Pesuseulonnassa käytetyn aineen määrä oli noin 2 kg. Kuivattu materiaali seulottiin 16, 8, 4, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125, ja 0,074 mm seulojen läpi. Seulonnassa käytettiin tärytintä 10 minuuttia, jolla aines saadaan kulkeutumaan seulojen läpi. Seuraavaksi jokaiselle seulalle sekä pohjalle jäänyt aines punnittiin. Lopuksi tuloksista laskettiin läpäisyprosentit.

Hienoaineksen rakeisuuden määrittämiseksi tehtiin areometri koe jossa seulottiin 100 g moreenia 0,074 mm seulan läpi. Moreeni sekä 50 ml peptisaattoriliuosta lisättiin areometriliisiin, jonka jälkeen lisättiin ionivaihdettua vettä niin, että seoksen tilavuudeksi tuli 1 000 ml. Seuraavaksi seosta sekoitettiin mekaanisella sekoittimella 15 minuuttia, jonka jälkeen sen annettiin seisoa yön yli. Seuraavana päivänä sekoitus toistettiin eli sekoitettiin uudelleen 15 minuuttia, jonka jälkeen aloitettiin itse mittaus, jossa lukemat otettiin areometrasta 2, 6, ja 20 minuutin, 1 ja 4 tunnin sekä 1 ja 4 vuorokauden kuluttua. Jokaisella mittaus kerralla mitattiin myös seoksen lämpötila. Lopuksi kuivaseulonnan ja areometri kokeen tulokset yhdistettiin piirtämällä ne rakeisuus taulukkoon, jonka avulla maalaji pystyttiin määrittämään.

6.4 Proctor-koe

Maksimikuivatilavuuspainon määrittämiseen käytettiin parannettua Proctor-menetelmää. Kokeet tehtiin hiekkamoreenille, lentotuhka-moreeni seoksille ja bentoniitti-moreeni seoksille. Lentotuhkan määrät olivat 10 % ja 30 % ja bentoniitin määrät 3 % ja 5 % seoksen massasta. Kokeet aloitettiin kuivaamalla moreeni ja sen jälkeen se seulottiin 16 mm seulan läpi. Yhteen kokeeseen tarvittava ainesmäärä oli noin 12 kg. Seulomisen jälkeen tehtiin neljä 3 kg:n näytettä, jonka jälkeen lisättiin vettä, jotta vesipitoisuus saatiin n. 4 - 12 %:iin, optimivesipitoisuus karkearakeisilla maalajeilla ja moreenilla on n. 5 - 15 %. Kostutetut näytteet annettiin homogenisoitua yön yli.

Seuraavaksi tehtiin varsinainen Proctor-koe, jossa käytettiin koesylinteriä, jonka sisähalkaisija oli 102 mm ja korkeus 116 mm, kaulusrengasta ja Proctor-vasaraa, jonka massa oli 4,54 kg ja pudotuskorkeus 457 mm. Kokeessa 3 kg:n seos lisättiin viidessä osassa sylinteriin ja jokaisen lisäyksen jälkeen vasaraa pudotettiin 25 kertaa. Koe tehtiin neljälle näytteelle, jonka jälkeen sullottu näyte punnittiin ja osa otettiin kuivaukseen vesipitoisuuden määrittämistä varten. Näytettä tarvittiin vähintään 200 g

vesipitoisuuden määrittämiseksi. Lopuksi tehtiin tarvittavat laskelmat kuivatilavuuspainojen ja vesipitoisuuksien määrittämiseksi sekä piirrettiin saadut tulokset koordinaatistoon, josta maksimikuivatilavuuspainon ja optimivesipitoisuuden pystyi määrittämään. Hiekkamoreenille ja 10 %:n lentotuhka—moreeni-seokselle Proctor-koe tehtiin käsin eli vasaraa pudoteltiin itse, 30 %:n seokselle ja bento—niitti seoksille koe tehtiin Proctor-laitteella jossa kone siis pudotti vasaraa.

6.5 Vedenläpäisevyys

Vedenläpäisevyyskoetta varten täytyy tehdä Proctor-koe, jonka avulla saadaan selville materiaalin maksimikuivatilavuuspaino ja optimivesipitoisuus. Näiden avulla laskettiin vedenläpäisykokeeseen tarvittavan näytteen määrä, joka oli noin 2 kg. Näyte sullottiin muottiin Proctor-vasaralla, näytettä lisättiin 5 kertaa ja jokaisen kerran jälkeen sitä lyötiin 10 kertaa. Näytekakku irrotettiin muotista ja sen ylä- ja alapuolella sijoitettiin huokoskivet ja suodatinpaperit (**Virhe. Viitteen lähdettä ei löytynyt.**). Huokoskivien avulla vedenvirtaus pysyy tasaisena ja näytekakku pysyy kasassa. Huokoskivien ilmauksella kivistä poistettiin ilma, jolloin vesi pääsee virtaamaan tasaisesti. Valmistetun näytteen ympärille asennettiin membraanikumi, jolla estettiin veden virtaaminen näytteen ja kumin välissä. Seuraavaksi näyte laitettiin näyteselliin ja se täytettiin vedellä. Näyteselliin liitettiin etu- ja takapainesellit, joihin lisättiin myös vettä ja tämän jälkeen selleihin asetettiin paineet. Tämän jälkeen testattiin vuotiko sellin hanat. Seuraavaksi tehtiin huokoskivien ilmastus, jonka jälkeen aloitettiin kylästysvaihe. Tässä vaiheessa näyte kyllästettiin, kyllästys oli valmis kun etupainesellin vedenpinta oli laskenut saman verran kuin takapainesellin vedenpinta oli noussut. Tämän jälkeen aloitettiin varsinainen mittaus, jossa etu- ja takapainesellien vedenpintojen muutokset ja siihen kulunut aika kirjattiin mittauspöytäkirjaan. Mittaukset suoritettiin 4 eri gradientilla ja jokaisella gradientilla tehtiin 4 mittausta. Lopuksi tulokset kirjattiin Excel-taulukkoon, jonka avulla materiaalin vedenläpäisevyys laskettiin.



Kuva 9. Sullonta muotti ja näytekakku (Kinnunen, 2017)

7 TULOKSET

Tulokset saatiin moreenin, lentotuhka—moreeni-seoksien ja bentoniitti—moreeni-seoksien vedenläpäisevyyksistä, Proctor-kokeista, optimivesipitoisuuksista ja rakeisuuskokeista. Bentoniittiseosten k-arvot saatiin Valtterin opinnäytetyön tuloksista, kuten myös bentoniittiseosten Proctor-tulokset ja optimivesipitoisuudet (Kinnunen 2017, 25). Lentotuhka-moreeniseoksissa käytetyn tuhkan määrä massasta olivat 10 % ja 30 %, bentoniittia käytettiin puolestaan 3 % ja 5 %. Vedenläpäisevyydestä saadut tulokset kirjattiin Excel-taulukkoon, jossa k-arvot saatiin määriteltyä (liite 3).

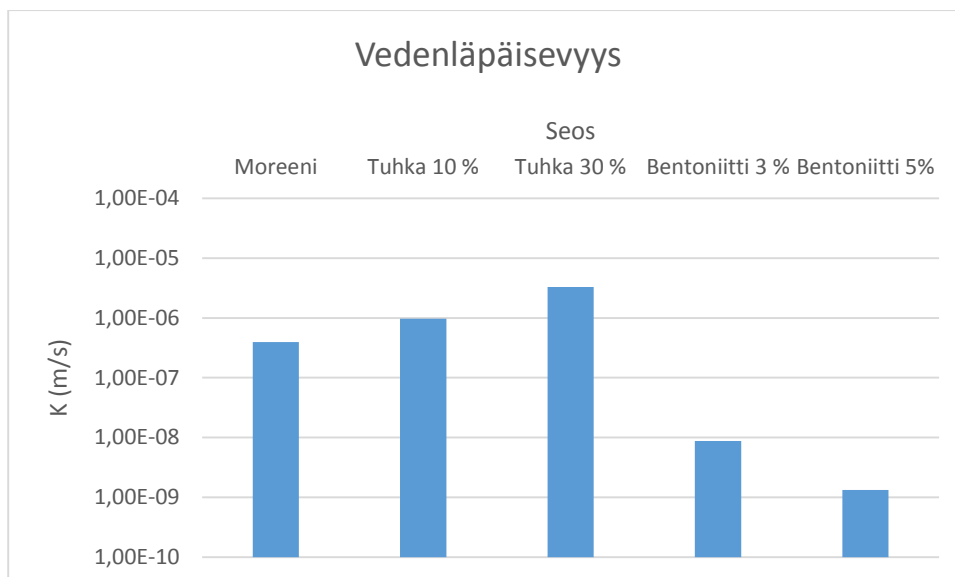
Lentotuhka—moreeni-seosten k-arvot olivat $9,77 \cdot 10^{-7}$ m/s 10 %:n lentotuhkaseokselle ja $3,30 \cdot 10^{-6}$ m/s 30 %:n lentotuhkaseokselle (Taulukko 3). Bentoniitti 5 %:n vedenläpäisevyyden k-arvo oli pienin $1,32 \cdot 10^{-9}$ m/s, 3 %:n bentoniittiseoksen k-arvo oli puolestaan $8,81 \cdot 10^{-9}$ m/s. Moreenin k-arvoksi saatiin $3,97 \cdot 10^{-7}$ m/s. Lentotuhka—moreeni-seosten ja moreenin vedenläpäisevyysskoheet kestivät 1 – 2 viikkoa kun bentoniitti—moreeni-seoksissa kesti puolestaan 5 - 6 viikkoa.

Taulukko 3. Kokeiden tulokset

Seos	Veden läpäisevyys (m/s)	Maksimikuivatilavuus- paino (kN/m ³)	Optimivesipitoisuus (%)
Lentotuhka 10 % +moreeni	$9,77 \cdot 10^{-7}$	21,0	8,0
Lentotuhka 30 % +moreeni	$3,30 \cdot 10^{-6}$	19,0	12,0
Bentoniitti 3 % +moreeni	$8,81 \cdot 10^{-9}$	21,3	7,0
Bentoniitti 5 % +moreeni	$1,32 \cdot 10^{-9}$	20,5	9,0
Moreeni	$3,97 \cdot 10^{-7}$	21,6	5,5

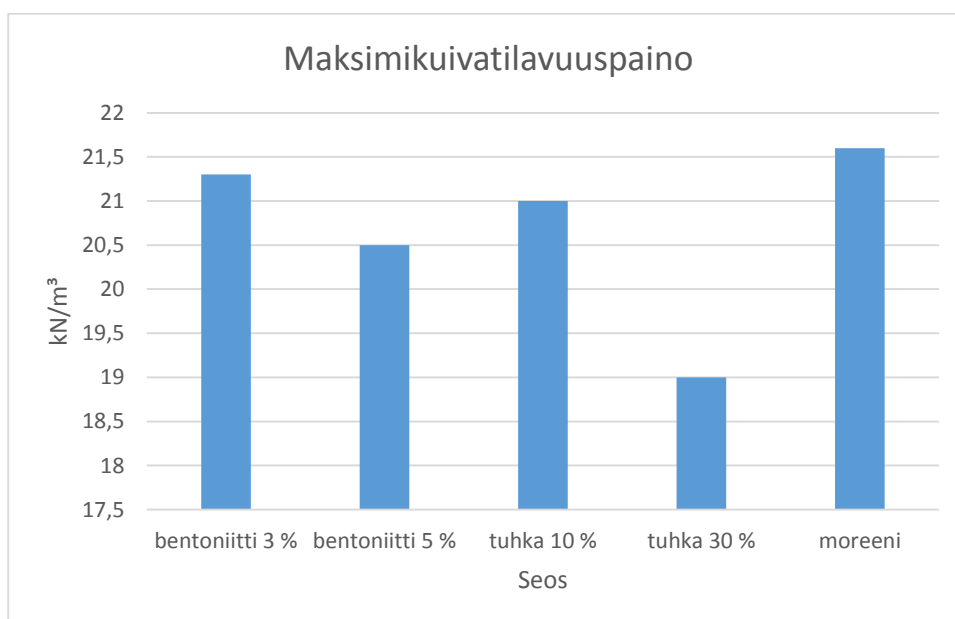
Vesi läpäisee lentotuhka—moreeni-seoksen paljon nopeammin kuin bentoniitti-moreeni-seoksen (kuvio 2). Lentotuhkaseos 30 % läpäisee vettä jopa noin tuhat kertaa nopeammin kuin 5 %:n bentoniittiseos, pelkän moreenin ja tuhaseosten välillä ero on huomattavasti pienempi. Bentoniitti 3 %:n seos on lähes kymmenen kertaa läpäisevämpää kuin 5 %:n bentoniittiseos. Bentoniittiseoksissa käytettiin erilaisia bentoniitteja.

Seosten optimivesipitoisuudet olivat melko lähellä toisiaan. Moreenilla se oli pienin 5,5 % ja 30 %:n lentotuhkaseoksella suurin 12,0 %. 10 %:n lentotuhkaseoksella optimivesipitoisuus oli 8,0 % ja 5 %:n bentoniittiseoksella 9,0 % ja 3 %:n bentoniittiseoksella puolestaan 7,0 %.

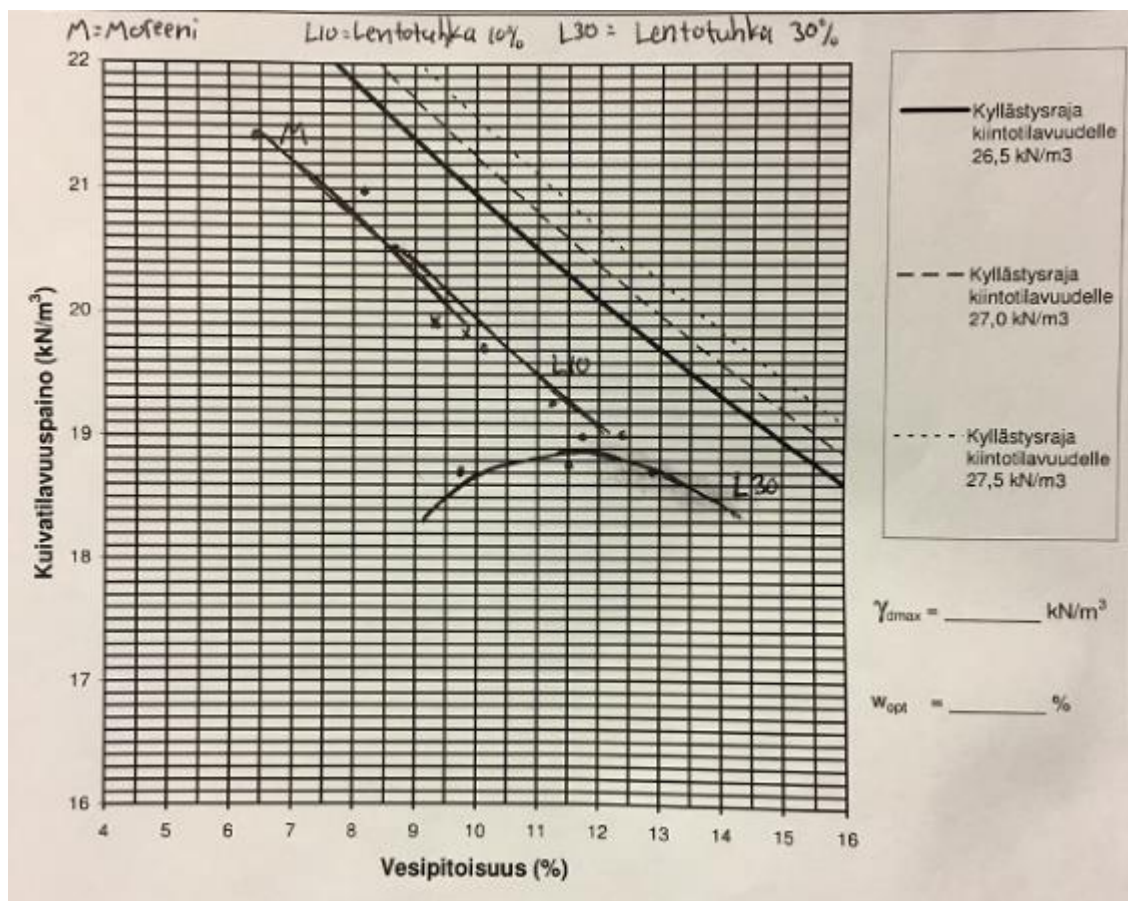


Kuvio 2. Seosten vedenläpäisevyydet

Moreenin maksimikuivatilavuuspaino oli suurin $21,6 \text{ kN/m}^3$ ja 30 %:n lentotuhka—moreeni-seoksen tulos oli pienin $19,0 \text{ kN/m}^3$ (kuvio 3). 10 %:n lentotuhkan tulos oli puolestaan $21,0 \text{ kN/m}^3$, Bentoniitti—moreeni-seosten tulokset olivat $21,3 \text{ kN/m}^3$, bentoniittia 3 % ja $20,5 \text{ kN/m}^3$, bentoniittia 5 % (liite 2). Lentotuhka-moreeni-seokselle, tuhkaa 10 % ja moreenille Proctor-kokeiden tulokset saatiin käsin käytettävällä vasaralla ja 30 %:n lentotuhkaseokselle ja bentoniittiseoksille puolestaan koneellisella Proctor-laitteella.



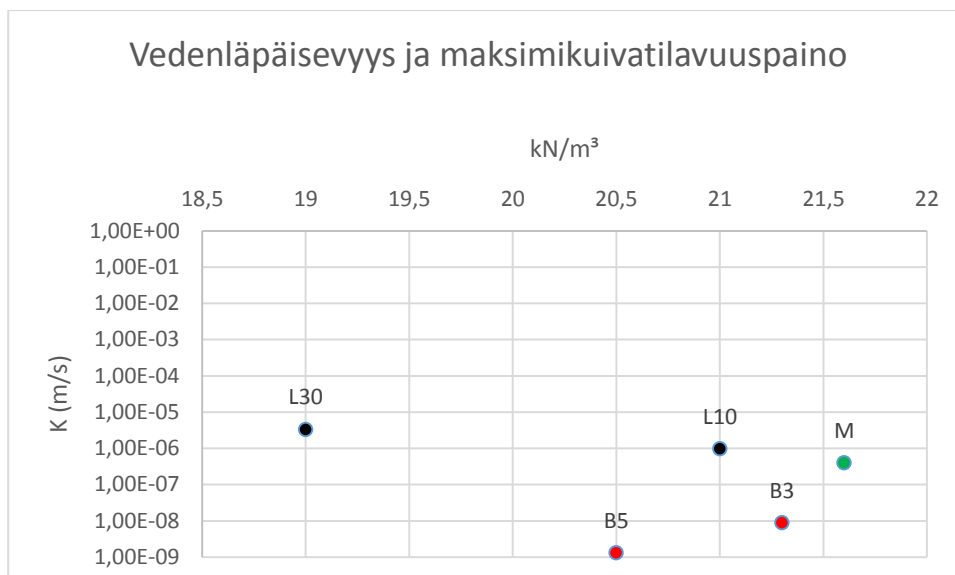
Kuvio 3. Seosten Maksimikuivatilavuuspainot



Kuva 10. Proctor-kokeiden tulokset koordinaatistossa

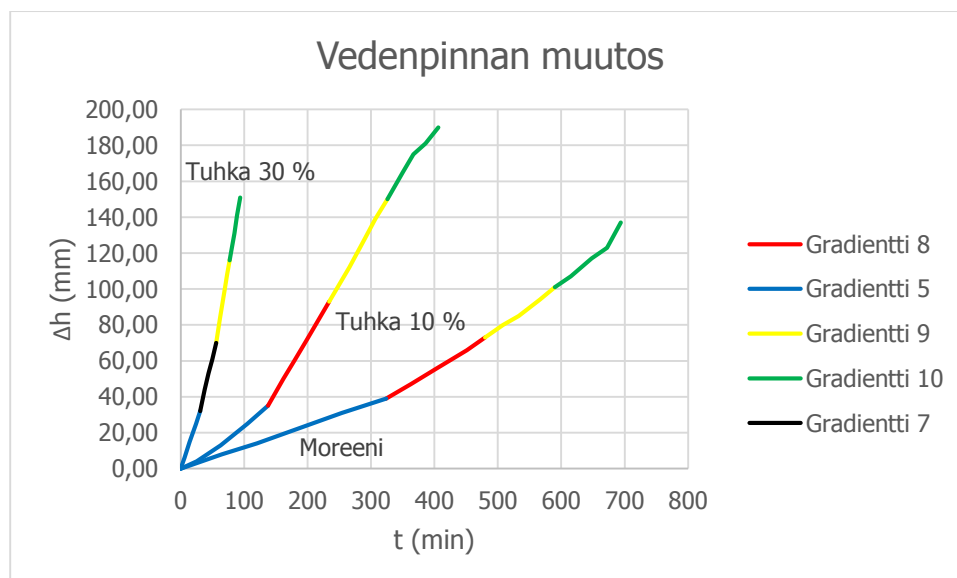
Proctor-kokeista saadut tulokset piirrettiin taulukkoon josta seosten maksimikuivatilavuuspaino ja optimivesipitoisuus saadaan selville (kuva 10). Moreenin ja 10 %:n lentotuhkaseoksen kuvaajat olivat suoria, vaikka niistä olisi pitänyt saada samanmuotoisia kuin 30 %:n lentotuhkaseoksen kuvaaja. Maksimikuivatilavuuspaino saadaan kuvaajan korkeimmasta kohdasta ja samasta kohdasta saadaan selville myös optimivesipitoisuus.

Lentotuhka 30 %:n maksimikuivatilavuuspaino on pienempi kuin lentotuhka 10 %:lla. Lentotuhka 30 %:n vedenläpäisevyys on taas puolestaan suurempi kuin 10 %:lla (kuvio 4). Moreenilla maksimikuivatilavuuspaino on suurempi kuin tuhkaseoksilla, mutta vedenläpäisevyys on pienempi. Bentoniittiseoksilla 5 %:lla maksimikuivatilavuuspaino ja vedenläpäisevyys ovat pienempi kuin 3 %:n bentoniittiseoksella. Moreenilla γ -arvo ja k -arvo ovat suurempia kuin bentoniittiseoksilla. Lentotuhka 10 %:n γ -arvo on pienempi kuin bentoniitti 3 %:lla, mutta suurempi kuin bentoniitti 5 %:lla. Lentotuhka 30 %:n γ -arvo on molempia bentoniittiseoksia pienempi. Lentotuhkaseosten vedenläpäisevydet ovat suurempia kuin bentoniittiseoksilla.



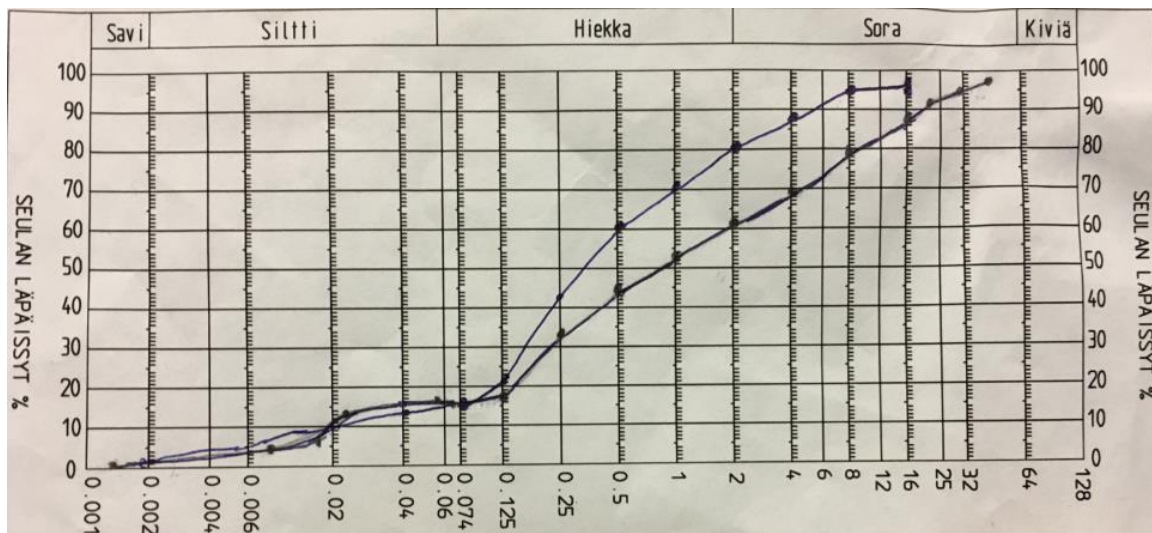
Kuvio 4. Seosten vedenläpäisevyys ja maksimikuivatilavuuspaino

Vedenläpäisevyyskokeissa seurattiin sellipaineita, etu- ja takapainesellien paineita sekä niissä tapahtuneita vedenpinnanmuutoksia ja niihin kulunutta aikaa (kuvio 5). Vedenläpäisykokeissa käytettiin neljää eri gradienttia eli neljää eri paine-eroa ja jokaisella gradientilla tehtiin neljä mittausta. Moreenilla ja 10 %:n lentotuhaseoksella käytetyt gradientit olivat 5, 8, 9 ja 10, 30 %:n tuhaseoksella käytettiin samoja gradientteja paitsi, että 8 gradientti korvattiin 7 gradientilla (liite 1). Kuviosta nähdään eri seosten vedenpinnan muutosnopeudet, mitä jyrkempi käyrä sitä nopeampi vedenpinnan muutos on. Moreenilla gradientin nostaminen suuremmaksi nopeutti vedenpinnanmuutosta, jokaisella kerralla. Lentotuhka 30 %:lla gradientin muuttaminen ei juurikaan vaikuttanut vedenpinnan muutosnopeuteen. Lentotuhka 10 %:lla ensimmäinen gradientin muutos nopeutti vedenpinnan muutosta, mutta lopuilla gradientteilla vedenpinnan muutosnopeus pysyi melko tasaisena.



Kuvio 5. Vedenläpäisevyyskokeen vedenpinnan muutokset

Rakeisuuskokeen avulla pystyttiin piirtämään kokeissa käytettyjen maa-ainesten rakeisuuskäyrät (kuva 11). Rakeisuuskäyrästä nähdään, että maa-aineksen on hiekkamoreenia, koska se sisältää samanaikaisesti yli 5 % sekä soraa, että hienoaainesta. Lisänimi hiekka saadaan siitä kun toista lajitetta on yli 30 % eli tässä tapauksessa hiekkaa on yli 30 %. Kokeissa käytettiin kahta eri maa-ainesta, mutta niiden rakeisuuskäyrät olivat melko samanlaiset.



Kuva 11. Hiekkamoreenin rakeisuuskäyrät

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tulosten perusteella nähdään, että lentotuhkaa lisäämällä vedenläpäisevyys nopeutuu verrattaessa pelkkään moreeniin ja bentoniittiseoksiin. Lentotuhkan lisäys moreeniin vaikuttaa melko paljon vedenläpäisevyyteen. Lentotuhka—moreeni-seosten k-arvot, $9,77 \cdot 10^{-7}$ m/s lentotuhka 10 %:lla ja $3,30 \cdot 10^{-6}$ m/s lentotuhka 30 %:lla, ovat huomattavasti suurempia kuin kaatopaikan pohja- ja pintarakenteille asetetut vaatimukset. Kaatopaikka asetuksen mukaan pohja- ja pintarakenteen k-arvon on oltava pienempi kuin $1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s, joten lentotuhka-moreeniseos ei vaikuttaisi soveltuvan kaatopaikan materiaaliksi. Moreenin k-arvo on $3,97 \cdot 10^{-7}$ m/s. Bentoniitti-moreeni-seoksen k-arvo $1,32 \cdot 10^{-9}$ m/s, bentoniitin määrän ollessa 5 %, on jo lähellä määrättyä k-arvoa. Mittauksia 5 %:n seokselle tehtiin vain yksi, joten sen soveltuvuuden selvittämiseksi kannattaisi tehdä lisämittauksia. Bentoniitti 3 %:lla ei puolestaan vaikuttaisi soveltuvan, sillä sen k-arvo $8,81 \cdot 10^{-9}$ m/s on huomattavasti suurempi kuin asetettu k-arvo, mutta lisätutkimukset voisivat silti olla tarpeen. Pienikin bentoniitin lisäys vaikuttaisi pienentävän vedenläpäisevyyttä merkittävästi, joten lisäämällä hieman bentoniittia voitaisiin päästä hyväksyttäviin arvoihin. Lentotuhka—bentoniitti—moreeni-seoksen soveltuvuutta kaatopaikan pohjamateriaalina kannattaisi tutkia, koska lisäämällä hieman bentoniittia voitaisiin päästä asetettuihin vaatimuksiin ja saada näin ollen myös lentotuhka hyötykäyttöön.

Proctor-kokeen tuloksista voidaan nähdä, että moreenin maksimikuivatilavuuspaino on suurin noin $21,6 \text{ kN/m}^3$. Tuhka vaikuttaisi pienentävän tiiveyttä, mikä vaikuttaisi olevan oikein, koska tuhka ei ole niin tiivistä kuin moreeni. Lentotuhka 10 %:n maksimikuivatilavuuspaino 21 kN/m^3 on vähän pienempi kuin moreenilla, mutta 30 % tuhkaa pienentää sitä jo enemmän. Bentoniitin lisäys myös alentaa seosten maksimikuivatilavuuspainoa. Moreenin optimivesipitoisuus on melko alhainen noin 5,5 % kun bentoniittiseoksilla se on 7 % ja 9 %. Tuhkaseoksilla optimivesipitoisuudet olivat 8 % tuhkan määrän ollessa 10 % ja 12 % kun tuhkaa oli 30 %. Proctor-kokeista saaduista tuloksista piirretyt kuvaajat olivat hieman erilaisempia kuin odotettiin, sillä kuvaajien olisi täytynyt olla paraabelin muotoisia, joista maksikuivatilavuuspaino ja optimivesipitoisuus saataisiin selville. Nyt maksimi ja optimi arvot täytyi arvioida kuvaajien ja aiempien tekemien kokeiden perusteella. Proctor-laitteella tehtyjen ja vasaraa itse pudottamalla tehtyjen kokeiden tulokset eivät vaikuttaneet merkittävästi eronneen toisistaan. Moreeni ja 10 %:n lentotuhka—moreeni-seoksille koe tehtiin pudottamalla vasaraa itse ja lopuille seoksille Proctor-laitteella.

Rakeisuuskäyrän avulla kokeissa käytetty maalaji pystyttiin selvittämään ja maalajiksi saatiin hiekkamoreeni. Maalaji oli hiekkamoreenia, koska se sisälsi yli 5 % sekä soraa, että hienoainesta ja sen lisäksi hiekkaa oli yli 30 %, joten lisänimeksi saatiin hiekka.

9 YHTEENVETO

Opinnäytetyö tehtiin Kuopion Jätekukolle ja työn tarkoitus oli selvittää lentotuhka—moreeni-seoksen soveltuvuutta kaatopaikan pohjamateriaalina. Tavoitteena oli löytää sellainen seos, jota voitaisiin käyttää pohjamateriaalina. Kaatopaikan pinta- ja pohjarakenteilla pyritään estämään suotovesien kulkeutumista ja imeytymistä maaperään ja ympäristöön. Lentotuhka—moreeni-seoksen soveltuvuutta tutkittiin kokeilla, joita olivat rakeisuuskoe, Proctor-koe ja vedenläpäisevyyskoe. Lisäksi tutkittiin pelkkää hiekkamoreenia ja bentoniitti—moreeni-seoksia. Lentotuhka—moreeni-seoksen vedenläpäisevyys oli $9,77 \cdot 10^{-7}$ m/s, kun lentotuhkaa oli 10 %, 30 %:n lentotuhkaseoksen k:n arvo oli $3,30 \cdot 10^{-6}$ m/s ja moreenin $3,97 \cdot 10^{-7}$ m/s. Bentoniitti—moreeni-seosten k-arvoiksi saatiin $1,32 \cdot 10^{-9}$ m/s ja $8,81 \cdot 10^{-9}$ m/s. Asetettu k-arvo oli $1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s, joten yksikään seos ei täytä vaadittua k-arvoa eli seokset eivät sovellu kaatopaikan pohjamateriaaliksi. Bentoniitin osalta voisi tehdä lisätutkimuksia, koska sen k-arvo on melko lähellä vaadittua arvoa. Myös lentotuhka—bentoniitti—moreeni-seoksia kannattaisi tutkia, koska bentoniittia lisäämällä voitaisiin päästä hyväksyttäviin arvoihin ja näin saataisiin myös lentotuhka hyötykäyttöön.

LÄHTEET

ALUEHALLINTOVIRASTO. Kuopion Jäteukon ympäristölupa ISAVI/3051/2014. [Verkkoaineisto]. Saatavissa: http://www.jatekukko.fi/media/liitetiedostot/jatekukko/ymparistoluvat/isavi_paa-tos_68_2015_1-2015-10-16-1.pdf

ASHPOWER. Yleistietoa lentotuhkasta. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2017-02-20] Saatavissa: <http://www.ashpower.fi/tietoa.html>

GEO-PETECH OY 2002. Työohjeet maalajien hydraulisen johtavuuden määrittämiseen laboratoriossa Concell-flexible-wall- tutkimuslaitteistolla.

GTK. Moreenikerrostumat. [Viitattu 2017-04-06.] Saatavissa: weppi.gtk.fi/aineistot/mp-opas/moree-nit.htm

JÄTEKUKKO OY. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2017-24-5] Saatavissa: <http://www.jatekukko.fi/>
 Polku 1: <http://www.jatekukko.fi/>. Yhtiö.
 Polku 2: <http://www.jatekukko.fi/>. Palvelut. Kuopion jätekeskus. Jätteiden käsittely. Loppusijoittaminen.
 Polku 3: <http://www.jatekukko.fi/>. Palvelut. Kuopio jätekeskus. Ympäristö. Ympäristövaikutukset.

KARINIEMI, Jarkko 2014. Tuhkat täyttömateriaalina. Oulun ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan koulutusohjelman opinnäyetyö. [Viitattu 2017-05-16]. Saatavissa: www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/72125/Kariniemi_Jarkko.pdf?sequence=1

KINNUNEN, Valtteri 2017. Bentoniitti—moreeni-seoksen soveltuvuus kaatopaikan pohja- ja pintarakenteena. Savonia-ammattikorkeakoulu. Ympäristötekniikan koulutusohjelman opinnäyetyö. [Viitattu 2017-05-05] Saatavissa: www.Theseus.fi

KINNUNEN, Valtteri 2017-05-12. [Digitaaliset kuvat]. Sijainti: Kuopio

LEPISTÖ, Jani, WESTERHOLM, Henrik, SCHULTZ, Eija, ULJAS, Jenni ja BJÖRKLÖF, Katarina 2014. Hyvät käytännöt pilaantuneiden maiden kenttätutkimuksissa.

PESONEN, Janne 2012. OULUN BIOTUHKIEN FRAKTIOINTI, KEMIALLISET OMINAISUUDET JA HYÖTYKÄYTTÖPOTENTIAALI. Oulun yliopiston kemian laitos. Fysikaalisen kemian Pro gradu –tutkielma. [viitattu 2017-03-13]. saatavissa: <http://www.metla.fi/hanke/7464/pdf/Janne-Pesonen-pro-gradu.pdf>

RONKAINEN Nanna. Suomen maalajien ominaisuuksia. Ympäristäkeskus 2012. [viitattu 2017-04-24.] Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38773/SY2_2012_Suomen_maalajien_ominaisuuksia.pdf

SAARELMA, Hanna 2011. Loppusijoitettavat tuhkan ominaisuuksia. Turun ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 2011-03-09.] Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/34232/Saarelma_Hanna.pdf.pdf?sequence=1

SAVONIA-AMMATTIKORKEAKOULU. Työohje: Proctor-koe.

SAVONIA-AMMATTIKORKEAKOULU. Työohje: Rakeisuus.

SEPPÄLÄ, Peter 2017-03-07. [Sähköpostiviesti]

SOININEN, H. MÄKELÄ, L. KYHKYNNEN, A. ja MUUKKONEN, E. 2010. BIOPOLTTOAINEITA KÄYTTÄVIEN ENERGIANTUOTANTOLAITOSTEN TUHKIEN HYÖTYKÄYTTÖ- JA LOGISTIIKKA-VIRRAT ITÄ-SUOMESSA. [viitattu 2017-3-7]. Saatavissa: http://docplayer.fi/2447006-Biopolttoaineita-kayttavien-energiantuotantolaitosten-tuhkien-hyotykaytto-ja-logistiikkavirrat-ita-suomessa.html#show_full_text

SUOMEN GEOTEKNILLINEN YHDISTYS RY. Ympäristötekniikan perusteet 2008.

SUOMEN GEOTEKNILLINEN YHDISTYS. Ympäristögeotekninen näytteenotto-opas maa-, hukos- kaasu- ja pohjavesinäytteet 2003.

SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUS 2002. Kaatopaikan tiivistysrakenteet. [Viitattu 2017-05-03]. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/41085/Ymp%C3%A4rist%C3%B6opas_36.pdf?sequence=1

TUHKARAKENTAMISEN KÄSIKIRJA. Energiatuotannon tuhkat väylä-, kenttä- ja maarakenteissa. Ramboll [Viitattu 2017-04-27]. Saatavissa: http://energia.fi/files/1137/tuhkarakentamisen_kasikirja.pdf

VALTIONEUVOSTON ASETUS KAASTOPAIKOISTA 2013/331, 6 § JA 7§. [Vekkoaineisto]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajan-tasa/2013/20130331?search%5Btype%5D=pika&search%5Bpika%5D=kaatopaikka>

LIITE 1: VEDENLÄPÄISEVYYDESSÄ KÄYTETTÄVÄT GRADIENTIT

Esimerkki käytettävistä paineista 12 cm korkealle näytekakulle

GRADIENTTI	SELLIPAIN [bar]	ETUPAIN [bar]	TAKAPAIN [bar]	PAINE-ERO [bar]
2	0.80	0.40	0.38	0.02
3	0.80	0.42	0.38	0.04
4	1.00	0.81	0.76	0.05
5	1.50	0.82	0.76	0.06
6	1.50	0.83	0.76	0.07
7	1.50	0.89	0.80	0.09
8	1.50	0.92	0.82	0.10
9	1.50	1.01	0.90	0.11
10	2.00	1.12	1.00	0.12
11	2.00	1.23	1.10	0.13
12	2.00	1.25	1.10	0.15
13	2.00	1.28	1.12	0.16
14	2.00	1.29	1.12	0.17
15	2.00	1.30	1.12	0.18
16	2.00	1.32	1.12	0.20
17	2.00	1.34	1.13	0.21
18	2.00	1.37	1.15	0.22
19	2.00	1.38	1.15	0.23
20	2.00	1.44	1.20	0.24
21	2.00	1.46	1.20	0.26
22	2.00	1.47	1.20	0.27
23	2.00	1.48	1.20	0.28
24	2.00	1.49	1.20	0.29
25	2.20	1.51	1.20	0.31
26	2.20	1.52	1.20	0.32
27	2.20	1.53	1.20	0.33
28	2.20	1.54	1.20	0.34
29	2.20	1.55	1.20	0.35
30	2.20	1.57	1.20	0.37
40	2.20	1.69	1.20	0.49
50	2.20	1.81	1.20	0.61
60	2.20	1.93	1.20	0.73

LIITE 2: PROCTOR-KOKEET

Näytteen valmistus, lentotuhka 10 %

Näyte	1	2	3	4
Näytteen massa (g)	3000	3000	3000	3000
Haluttu kosteus (%)	7	8	9	10
Lisättävä vesimäärä (g)	210	240	270	300

Näytteen vesipitoisuus

Kostea näyte (g)	355,1	307,0	310,1	342,6
Kuiva näyte (g)	326,8	278,9	278,2	304,7
Veden massa (g)	28,3	28,0	31,3	37,9
Näytteen vesipitoisuus (%)	8,66	10,05	11,25	12,4

Sullottu näyte

Kostean näytteen massa (g)	2142,0	2085,6	2057,0	2056,9
Kuivan näytteen massa (g)	1971,3	1895,1	1849,0	1829,9
Näytteen kuivatilavuuspaino (kN/m ³)	20,5	19,7	19,3	19,0

Näytteen valmistus, lentotuhka 30 %

Näyte	1	2	3	4
Näytteen massa (g)	3000	3000	3000	3000
Haluttu kosteus (%)	4	5	6	7
Lisättävä vesimäärä (g)	120	150	180	210

Näytteen vesipitoisuus

Kostea näyte (g)	335,0	351,0	290,0	353,0
Kuiva näyte (g)	305,4	314,9	259,6	313,0
Veden massa (g)	29,6	36,1	30,4	40
Näytteen vesipitoisuus (%)				

Sullottu näyte

Kostean näytteen massa (g)	1969,0	2006,0	2039,4	2030,2
Kuivan näytteen massa (g)	1794,9	1799,1	1825,8	1799,8
Näytteen kuivatilavuuspaino (kN/m ³)	18,7	18,4	19,0	18,7

Näytteen valmistus, moreeni

Näyte	1	2	3	4
Näytteen massa (g)	3000	3000	3000	3000
Haluttu kosteus (%)	7	8	9	10
Lisättävä vesimäärä (g)	210	240	270	300

Näytteen vesipitoisuus

Kostea näyte (g)	331,5	315,8	305,7	315,9
Kuiva näyte (g)	311,4	291,9	279,3	287,6
Veden massa (g)	20,1	23,9	26,4	28,3
Näytteen vesipitoisuus (%)	6,45	8,19	9,45	9,84

Sullottu näyte

Kostean näytteen massa (g)	2202,6	2179,8	2089,4	2084,3
Kuivan näytteen massa (g)	2069,1	2014,8	1909,0	1897,6
Näytteen kuivatilavuuspaino (kN/m ³)	21,5	21,0	19,9	19,8

LIITE 3: VEDENLÄPÄISEVYYDEN MITTAUSTULOKSET

Lentotuhka 30 % + moreeni

bar	bar	bar			mm	mm	mm	mm
sellipaine	etu- paine	takapaine	aika alussa	aikalopussa	mevesi alu.	mevesi lop.	tuvesi al.	tuvesi lo.
1,5	0,82	0,76	14.2.2017 10:37:00	14.2.2017 10:43:00	116,00	108,00	50,00	56,00
1,5	0,82	0,76	14.2.2017 10:43:00	14.2.2017 10:51:00	108,00	100,00	56,00	65,00
1,5	0,82	0,76	14.2.2017 10:51:00	14.2.2017 11:01:00	100,00	90,00	65,00	75,00
1,5	0,82	0,76	14.2.2017 11:01:00	14.2.2017 11:08:00	90,00	82,00	75,00	82,00
1,5	0,89	0,8	14.2.2017 11:11:00	14.2.2017 11:18:00	81,00	69,00	82,00	94,00
1,5	0,89	0,8	14.2.2017 11:18:00	14.2.2017 11:24:00	69,00	59,00	94,00	103,00
1,5	0,89	0,8	14.2.2017 11:24:00	14.2.2017 11:30:00	59,00	51,00	103,00	111,00
1,5	0,89	0,8	14.2.2017 11:30:00	14.2.2017 11:36:00	51,00	42,00	111,00	120,00
1,5	1,01	0,9	14.2.2017 11:40:00	14.2.2017 11:46:00	158,00	143,00	40,00	54,00
1,5	1,01	0,9	14.2.2017 11:46:00	14.2.2017 11:53:00	143,00	129,00	54,00	69,00
1,5	1,01	0,9	14.2.2017 11:53:00	14.2.2017 11:57:00	129,00	119,00	69,00	78,00
1,5	1,01	0,9	14.2.2017 11:57:00	14.2.2017 12:01:00	119,00	111,00	78,00	86,00
2	1,12	1	14.2.2017 12:13:00	14.2.2017 12:16:00	98,00	93,00	90,00	96,00
2	1,12	1	14.2.2017 12:16:00	14.2.2017 12:21:00	93,00	83,00	96,00	105,00
2	1,12	1	14.2.2017 12:21:00	14.2.2017 12:25:00	83,00	74,00	105,00	115,00
2	1,12	1	14.2.2017 12:25:00	14.2.2017 12:30:00	74,00	63,00	115,00	125,00

Mevesi on etupainesellin vedenkorkeus alussa ja lopussa. Tuvesi on takapainesellin vedenkorkeus alussa ja lopussa.

Moreeni

bar	bar	bar			mm	mm	mm	mm
sellipaine	etupaine	takapaine	aika alussa	aikalopussa	mevesi alu.	mevesi lop.	tuvesi al.	tuvesi lo.
1,5	0,82	0,76	13.2.2017 12:25:00	13.2.2017 13:30:00	153,00	142,00	49,00	57,00
1,5	0,82	0,76	13.2.2017 13:30:00	13.2.2017 14:25:00	142,00	134,00	57,00	63,00
1,5	0,82	0,76	14.2.2017 10:15:00	14.2.2017 12:29:00	134,00	116,00	63,00	80,00
1,5	0,82	0,76	14.2.2017 12:30:00	14.2.2017 13:40:00	116,00	108,00	80,00	88,00
1,5	0,92	0,82	15.2.2017 10:15:00	15.2.2017 10:54:00	108,00	98,00	88,00	96,00
1,5	0,92	0,82	15.2.2017 10:54:00	15.2.2017 11:35:00	98,00	89,00	96,00	105,00
1,5	0,92	0,82	15.2.2017 11:35:00	15.2.2017 12:22:00	89,00	79,00	105,00	115,00
1,5	0,92	0,82	15.2.2017 12:23:00	15.2.2017 12:52:00	79,00	72,00	115,00	122,00
1,5	1,01	0,9	15.2.2017 12:54:00	15.2.2017 13:22:00	154,00	146,00	60,00	67,00
1,5	1,01	0,9	15.2.2017 13:22:00	15.2.2017 13:47:00	146,00	140,00	67,00	72,00
1,5	1,01	0,9	16.2.2017 10:15:00	16.2.2017 10:48:00	140,00	130,00	72,00	81,00
1,5	1,01	0,9	16.2.2017 10:48:00	16.2.2017 11:12:00	130,00	124,00	81,00	88,00
2	1,12	1	16.2.2017 11:15:00	16.2.2017 11:37:00	124,00	117,00	88,00	94,00
2	1,12	1	16.2.2017 11:37:00	16.2.2017 12:10:00	117,00	106,00	94,00	104,00
2	1,12	1	16.2.2017 12:10:00	16.2.2017 12:28:00	106,00	100,00	104,00	110,00
2	1,12	1	16.2.2017 12:28:00	16.2.2017 13:15:00	100,00	88,00	110,00	124,00

Lentotuhka 10 % + moreeni

bar	bar	bar			mm	mm	mm	mm
sellipaine	etu-paine	takapaine	aika alussa	aikalopussa	mevesi alu.	mevesi lop.	tuvesi al.	tuvesi lo.
1,5	0,82	0,76	14.2.2017 13:15:00	14.2.2017 13:40:00	128,00	110,00	107,00	111,00
1,5	0,82	0,76	15.2.2017 10:15:00	15.2.2017 10:53:00	111,00	98,00	111,00	120,00
1,5	0,82	0,76	15.2.2017 10:53:00	15.2.2017 11:35:00	98,00	86,00	120,00	132,00
1,5	0,82	0,76	15.2.2017 11:35:00	15.2.2017 12:08:00	86,00	77,00	132,00	142,00
1,5	0,92	0,82	15.2.2017 12:10:00	15.2.2017 12:34:00	149,00	134,00	70,00	85,00
1,5	0,92	0,82	15.2.2017 12:34:00	15.2.2017 12:51:00	134,00	123,00	85,00	95,00
1,5	0,92	0,82	15.2.2017 12:51:00	15.2.2017 13:10:00	123,00	111,00	95,00	106,00
1,5	0,92	0,82	15.2.2017 13:10:00	15.2.2017 13:46:00	111,00	90,00	106,00	128,00
1,5	1,01	0,9	16.2.2017 10:16:00	16.2.2017 10:48:00	150,00	130,00	68,00	87,00
1,5	1,01	0,9	16.2.2017 10:49:00	16.2.2017 11:13:00	130,00	113,00	87,00	103,00
1,5	1,01	0,9	16.2.2017 11:13:00	16.2.2017 11:30:00	113,00	102,00	103,00	114,00
1,5	1,01	0,9	16.2.2017 11:30:00	16.2.2017 11:49:00	102,00	90,00	114,00	125,00
2	1,12	1	16.2.2017 11:50:00	16.2.2017 12:10:00	90,00	74,00	125,00	140,00
2	1,12	1	16.2.2017 12:10:00	16.2.2017 12:23:00	74,00	64,00	140,00	150,00
2	1,12	1	16.2.2017 12:24:00	16.2.2017 12:35:00	64,00	57,00	150,00	156,00
2	1,12	1	16.2.2017 12:35:00	16.2.2017 13:47:00	57,00	48,00	156,00	165,00